

Исследование влияния ассимиляции мгновенных данных наблюдений со спутников на воспроизведение температуры поверхности моря в модели динамики Чёрного и Азовского морей

Е. И. Пармузин^{1,2}, Н. Р. Лёзина¹, В. И. Агошков^{1,2}

¹ *Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН
Москва, 119333, Россия
E-mail: e.parmuzin@inm.ras.ru*

² *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Москва, 119991, Россия*

Приводятся результаты исследований по оценке влияния ассимиляции оперативных данных наблюдений дистанционного зондирования на воспроизведение температуры поверхности моря в численной модели гидротермодинамики Чёрного и Азовского морей. В качестве данных наблюдений используются данные температуры поверхности моря, полученные из Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» со спутников Aqua, Terra и SNPP (*англ.* Suomi National Polar-Orbiting Operational Environmental Satellite System (NPOESS) Preparatory Project). Особенностью рассматриваемой процедуры вариационной ассимиляции стал выбор потока тепла на поверхности моря в качестве управления, что позволяет ассимилировать данные в текущий момент без дополнительной интерполяции на подобласти, где данные наблюдений отсутствовали в рассматриваемый момент времени. Для численных расчётов использовалась математическая модель морской циркуляции INMOM (*англ.* Institute of Numerical Mathematics Ocean Model), разработанная в Институте вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН. Результаты численных экспериментов с ассимиляцией данных наблюдений температуры поверхности моря со спутников Aqua, Terra и их сравнение с данными наблюдений спутника SNPP подтвердили возможность использования рассматриваемой процедуры вариационной ассимиляции данных при расчётах по численной модели гидротермодинамики моря и построения реалистичных полей реанализа гидротермодинамических величин.

Ключевые слова: температура поверхности моря, вариационная ассимиляция, данные наблюдений со спутников, центр коллективного пользования

Одобрена к печати: 10.04.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-61-69

Введение

В настоящее время в связи с возрастающим количеством данных наблюдений усиливается интерес к методам усвоения данных в задачах математического моделирования геофизических процессов и явлений. Системы усвоения данных наблюдений призваны в первую очередь повысить качество мониторинга и прогнозирования при использовании методов математического моделирования и современных вычислительных комплексов в различных акваториях Мирового океана (Беляев и др., 2018; Зеленько и др., 2016; Шутяев, 2019; Agoshkov, Zalesny, 2012). В последние годы такие системы развиваются и для мониторинга и прогнозирования состояния Чёрного моря (Коротаев и др., 2016; Лишаев и др., 2020; Полонский, Серебренников, 2023; Фомин, Дианский, 2023; Ciliberti et al., 2022).

Поэтому разработка и проверка алгоритмов численного решения задач вариационной ассимиляции данных наблюдений — актуальная проблема современной вычислительной математики (Беляев и др., 2015). Одним из критериев оценки качества и эффективности метода ассимиляции представляется сравнение результатов расчётов с использованием метода вариационной ассимиляции данных наблюдений и без его применения. Также возможно сравнение с различными источниками данных, например со спутников с разными измерительными приборами, с буёв, стационарных платформ т. д.

В настоящей работе использовались данные спутников Aqua, Terra и SNPP (*англ.* Suomi National Polar-Orbiting Operational Environmental Satellite System (NPOESS) Preparatory Project). Эти данные в формате, пригодном для применения в численной модели, были предоставлены сервисом See the Sea, входящим в состав Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015). Отметим, что в основном данная информация не покрывает всю исследуемую акваторию, поэтому в процедуре ассимиляции используется характеристическая функция, определяющая наличие данных на момент усвоения. В отличие от большинства задач вариационной ассимиляции данных, в настоящей работе в качестве управления выступает поток тепла на границе с морем, который входит в функционал стоимости.

Цель работы — провести исследование влияния ассимиляции данных со спутников на воспроизведение температуры поверхности моря (ТПМ) при расчёте по модели гидротермодинамики Чёрного и Азовского морей. В качестве ассимилируемой информации были выбраны данные со спутников Aqua и Terra (оснащённых спектрорадиометром MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)), результаты расчёта по модели с ними сравнивались с данными ТПМ со спутника SNPP (радиометр VIIRS (*англ.* Visible Infrared Imaging Radiometer Suite)).

Данные наблюдений, модель океана и используемый метод вариационной ассимиляции

В настоящей работе привлекаются данные о температуре поверхности Чёрного и Азовского морей за 2021 г., предоставленные ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015). Расчёт осуществляется по численной модели гидротермодинамики INMOM (*англ.* Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) (Zalesny et al., 2012), основанной на системе уравнений, записанных в приближении Буссинеска и гидростатики в обобщённой σ -системе координат на сфере. Модель дополнена процедурой вариационной ассимиляции данных наблюдений, предложенной В. И. Агошковым с коллегами (Agoshkov et al., 2022).

Для решения задачи моделирования состояния морской среды с использованием вариационной ассимиляции данных вводится функционал стоимости, характеризующий отклонение решения математической модели от наблюдений. Ставится задача поиска решения, при котором минимизируется заданный функционал. Одним из методов решения поставленной задачи является сведение её к системе оптимальности, состоящей из уравнения модели, сопряжённого уравнения и уравнения для управления, которым становится функция потока тепла на поверхности моря. Функционал стоимости:

$$J(Q, T) = \frac{1}{2} \int_0^{\bar{t}} \int_{\Omega} |Q - Q^0| B^{-1} |Q - Q^0| d\Omega dt + \frac{1}{2} \int_0^{\bar{t}} \int_{\Omega} m_0 |T - T_{obs}| R^{-1} |T - T_{obs}| d\Omega dt.$$

Здесь Q — полный поток тепла на поверхности моря; Q^0 — климатический поток тепла, рассматриваемый в качестве «бэкграунда» (фона); T — рассчитанная по модели температура поверхности моря; T_{obs} — данные наблюдений со спутников; Ω — рассматриваемая область пространства; \bar{t} — интервал времени; R и B — ковариационные матрицы ошибок данных наблюдений и ошибок бэкграунда, которые вычислялись следующим образом. На основе данных о ТПМ сервиса Copernicus (система Европейских центров морских прогнозов Copernicus — *англ.* Copernicus Marine Environment Monitoring Service — CMEMS) (data.marine.copernicus.eu) за 1982–2019 гг. вычислено статистическое осреднение и среднеквадратическое отклонение. Полученные статистические характеристики используются как коэффициенты в ковариационных матрицах ошибок наблюдений R , обратные к которым включаются в качестве весовых операторов в исходный функционал стоимости при решении задачи вариационной ассимиляции данных. Поток тепла на поверхности моря рассчитан по данным реанализа European Reanalysis 5-го поколения (ERA5) за период с 1979 по 2021 г. Вычислены средние значения и дисперсия теплового потока по дневным и ночным данным для каждого дня года.

Полученные величины дисперсии представляют собой диагональные элементы ковариационной матрицы ошибок бэкграунда B . Функция m_0 равна единице, если информация присутствует в данной области в рассматриваемый момент времени, и нулю — если эта информация отсутствует.

Система оптимальности в классическом виде для уравнения конвекции-диффузии температуры T в σ -системе координат имеет вид:

$$\begin{cases} T_t + \frac{1}{2H} \left(w_1 \frac{\partial T}{\partial \sigma} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 w_1 T)}{\partial \sigma} \right) - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{r^2 v_T}{H^2} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right) = f_T, & t \in (t_{j-1}, t_j), \\ T = T_1(t_j) & \text{при } t = t_{j-1}, \\ -\frac{v_T}{H} \frac{\partial T}{\partial \sigma} = Q & \text{при } \sigma = 0, \quad \frac{v_T}{H} \frac{\partial T}{\partial \sigma} = 0 & \text{при } \sigma = 1, \end{cases}$$

$$\begin{cases} -T_t^* - \frac{1}{2H} \left(w_1 \frac{\partial T^*}{\partial \sigma} + \frac{\partial (w_1 T^*)}{\partial \sigma} \right) - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(r^2 \frac{v_T}{H^2} \frac{\partial T^*}{\partial \sigma} \right) = 0, & t \in (t_{j-1}, t_j) & \text{при } 0 < \sigma < 1, \\ T^* = 0 & \text{при } t = t_j, \\ -w_1 T^* - \frac{v_T}{H} \frac{\partial T^*}{\partial \sigma} = m_0 R^{-1} (T - T_{obs}) & \text{при } \sigma = 0, \quad \frac{v_T}{H} \frac{\partial T^*}{\partial \sigma} = 0 & \text{при } \sigma = 1. \end{cases}$$

$$B^{-1} (Q - Q^{(0)}) + T^* = 0,$$

где T^* — решение сопряжённого уравнения; H — глубина океана; w_1 — вертикальная скорость у поверхности моря; v_T — коэффициент турбулентного обмена; r — радиус Земли; f_T — заданные силы внешнего воздействия.

Построение приближённого решения всей полной численной модели с одновременным определением Q посредством процедуры вариационной ассимиляции T_{obs} может быть осуществлено следующим итерационным алгоритмом. Пусть $Q^{(k)}$ — известное приближение к Q , тогда решается прямая задача, сопряжённая задача и вычисляется следующее приближение $Q^{(k+1)}$ по формуле:

$$Q^{(k+1)} = Q^{(k)} - \gamma_k \left(B^{-1} (Q^{(k)} - Q^{(0)}) + T^* \right) \text{ на } \Omega \times (t_0, t_1).$$

В силу свойства плотной разрешимости рассматриваемой задачи (Agoshkov et al., 2022) параметры $\{\gamma_k\}$ могут быть выбраны по следующей формуле:

$$\gamma_k = \frac{1}{2} \frac{\int_{t_0}^{t_1} \int_{\Omega} (T - T_{obs})^2 \Big|_{\sigma=0} d\Omega dt}{\int_{t_0}^{t_1} \int_{\Omega} (T^*)^2 \Big|_{\sigma=0} d\Omega dt}.$$

В этом случае для сходимости предложенного итерационного алгоритма потребуются минимальное количество итераций. Итерации выполняются до достижения требуемой точности.

Результаты численных расчётов

В качестве объекта моделирования рассматривались акватории Чёрного и Азовского морей. Нижняя левая точка расчётной сетки типа «С» имеет координаты $26,65^\circ$ в.д. и $40,15^\circ$ с.ш., а верхняя правая — $41,9^\circ$ в.д. и $47,31^\circ$ с.ш. Шаг сетки по пространственным переменным x, y

равен $0,05$ и $0,036^\circ$ соответственно, шаг по времени выбирался равным 2 мин 30 с. В качестве начального значения поля температуры для расчёта брались данные, полученные при вычислениях за предшествующий год с вариационной ассимиляцией данных (Захарова и др., 2022). Так как была показана хорошая корреляция между данными со спутников Aqua, Terra и SNPP (Захарова, Шевченко, 2023), предложен следующий метод для оценки влияния ассимиляции на воспроизведение ТПМ в численной модели. Были проведены несколько серий численных экспериментов: в первой серии в процедуре ассимиляции использовались данные со спутников Aqua и Terra совместно, во второй — только Aqua, в третьей — только Terra. Отметим также, что результаты всех расчётов выводились в моменты времени, соответствующие данным, получаемым со спутника SNPP. Общий расчёт проводился на один 2021 г.

Данные наблюдений, используемые в процедуре вариационной ассимиляции, приведены на *рис. 1* (UTC — *англ.* Coordinated Universal Time, всемирное координированное время).

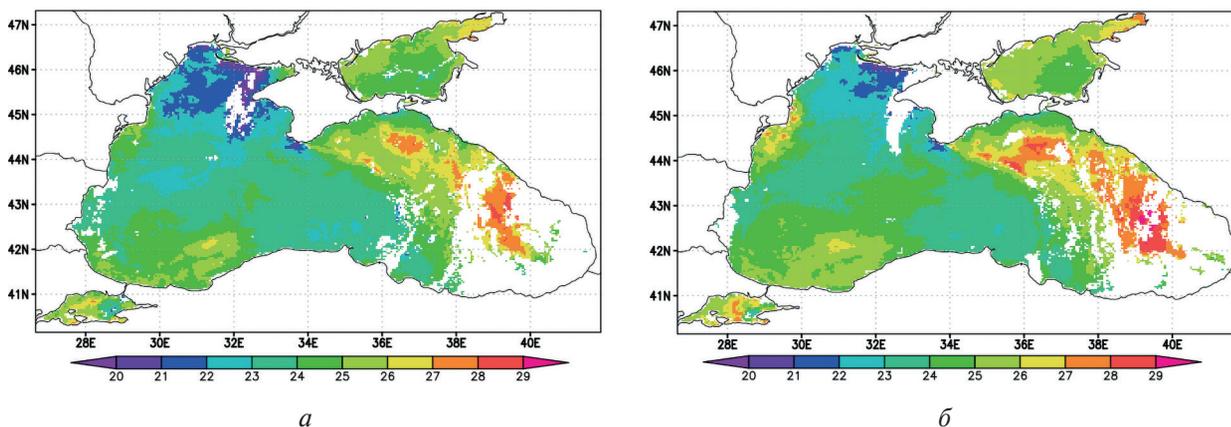


Рис 1. Данные наблюдений ТПМ ($^\circ\text{C}$), используемые при ассимиляции 28 июня 2021 г. со спутников: *a* — Terra, время наблюдения 08:45 UTC; *б* — Aqua, время наблюдения 10:30 UTC

На *рис. 2* приведены данные со спутника SNPP, с которыми сравниваются результаты расчёта по модели с ассимиляцией данных на 10:24 UTC 28 июня 2021 г.

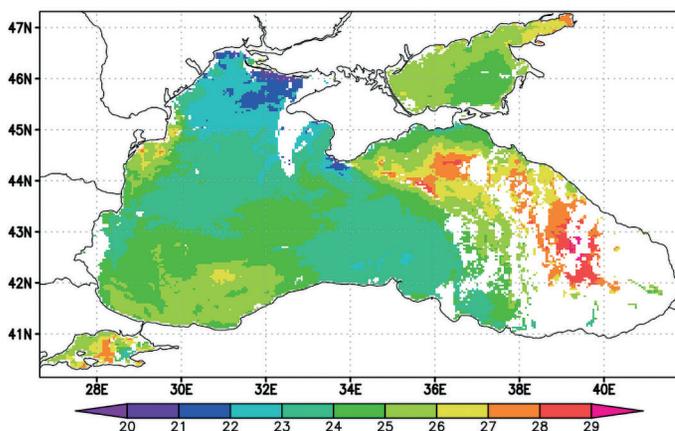


Рис 2. Данные наблюдений ТПМ ($^\circ\text{C}$) со спутника SNPP в 10:24 UTC 28 июня 2021 г.

По результатам проведённых расчётов были получены отклонения среднего значения ТПМ от контрольных наблюдений (*bias*) и среднеквадратичная ошибка (*англ.* Root Mean Square Error — RMSE) для всех проведённых экспериментов за неделю (*рис. 3*, см. с. 65). Отметим, что данные характеристики для результатов расчётов с применением ассимиляции

со спутников отдельно Aqua, Terra и одновременно двух спутников ближе к нулю, чем результаты расчётов по модели. Особенно заметны отличия расчёта по модели от контрольных наблюдений в летние месяцы, в то время как результаты расчётов с ассимиляцией не показывают такого значительного расхождения.

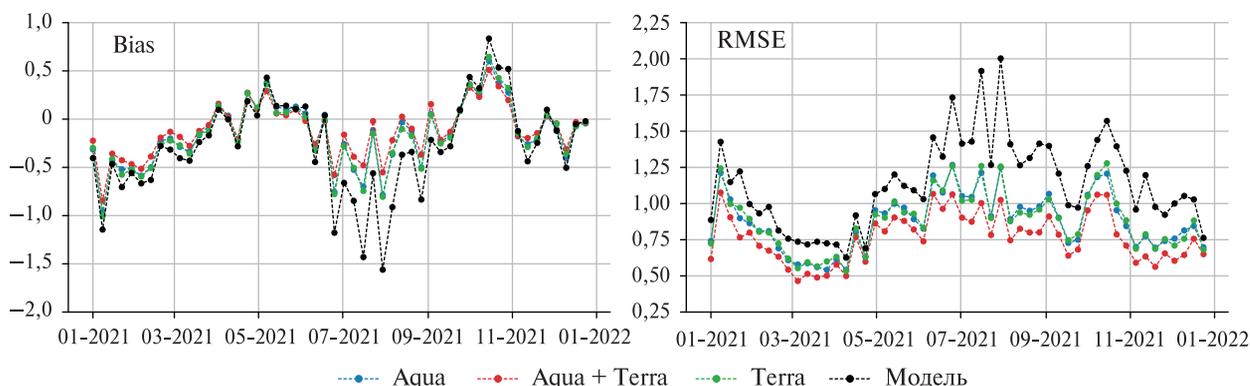


Рис. 3. Значения bias и RMSE в 2021 г., где Aqua — результаты расчётов с применением ассимиляции данных со спутника Aqua; Aqua + Terra — с ассимиляцией данных со спутников Aqua и Terra; Terra — с ассимиляцией данных со спутника Terra; Model — без ассимиляции

Также на рис. 4 и 5 (см. с. 66) приведено отклонение средней ТПМ от контрольных данных для некоторых моментов времени.

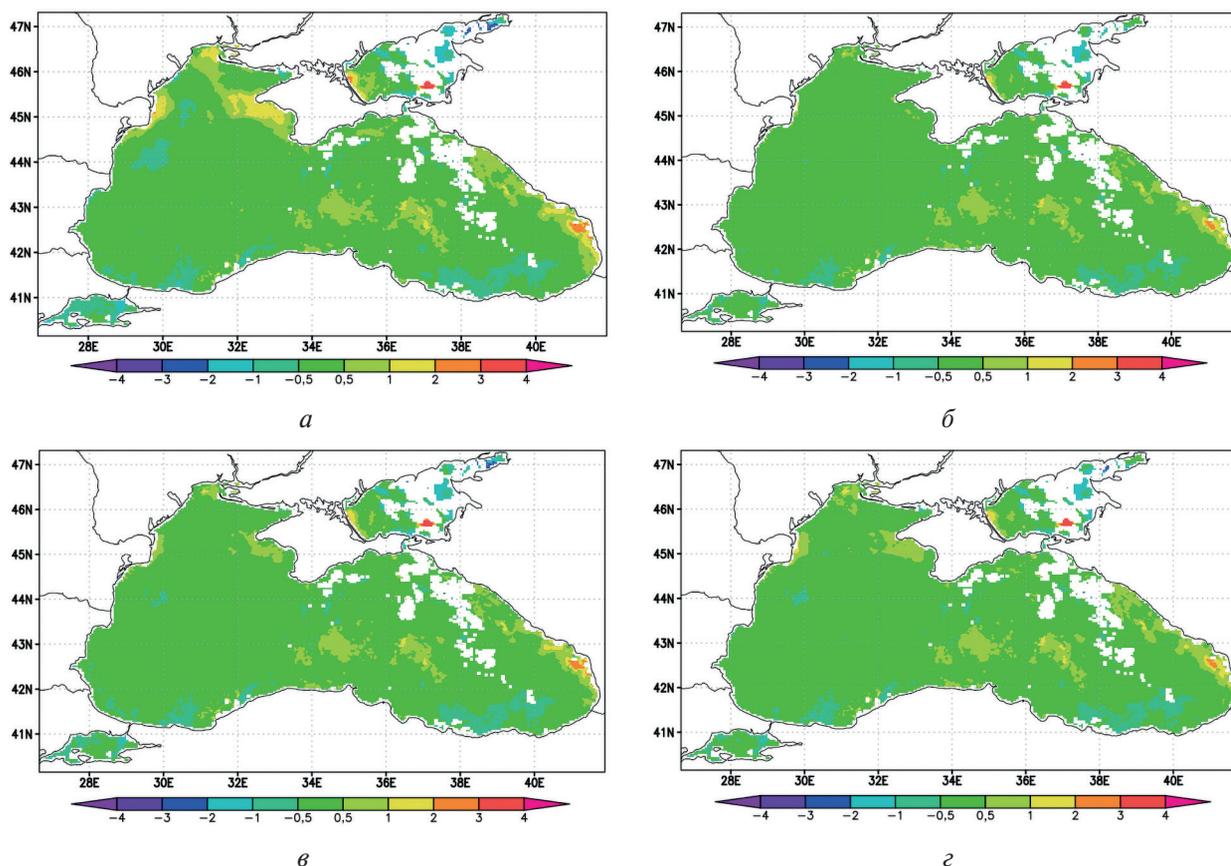


Рис. 4. Разность между рассчитанными средними полями ТПМ ($^{\circ}\text{C}$) по модели и контрольными данными с 9 по 15 апреля 2021 г. Расчёт по модели: а — без ассимиляции; с ассимиляцией данных со спутников: б — Aqua и Terra; в — Aqua; г — Terra

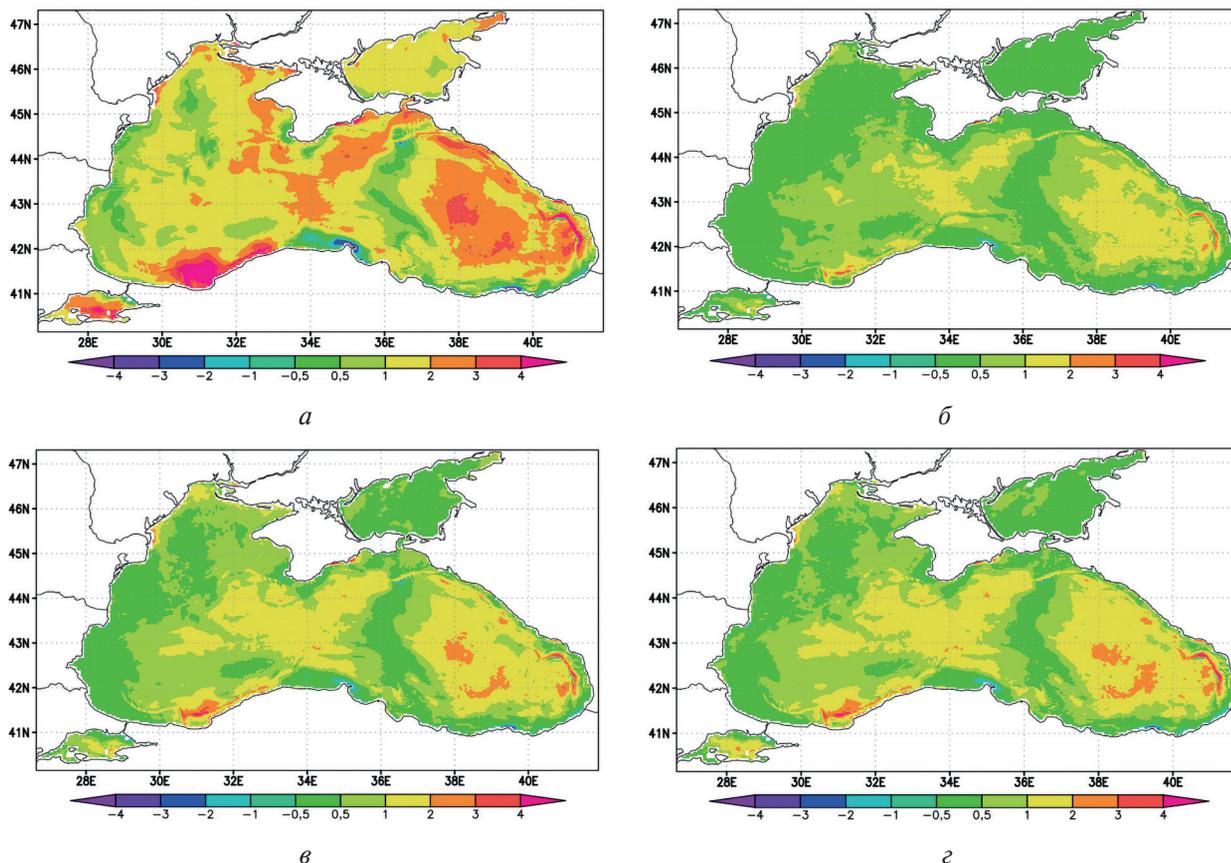


Рис. 5. Разность между рассчитанными средними полями ТПМ (°С) по модели и контрольными данными с 30 июля по 5 августа 2021 г. Расчёт по модели: а — без ассимиляции; с ассимиляцией данных со спутников: б — Aqua и Terra; в — Aqua; г — Terra

По результатам проведённых численных экспериментов можно заключить, что в зимние и весенние месяцы расчёты по модели без ассимиляции и с ассимиляцией данных о ТПМ различаются незначительно. Так, при расчётах без усвоения данных наблюдается занижение температуры в некоторых прибрежных зонах на северо-западе и востоке экватории Чёрного моря, причём разница с данными, полученными со спутника SNPP, может достигать до 2 °С. Введение процедуры ассимиляции позволяет сократить это отличие на 1–1,5 °С при ассимиляции информации одновременно с обоих спутников и на 1 °С при ассимиляции только с одного спутника. Тогда как результаты ассимиляции данных только со спутника Aqua незначительно отличаются от ассимиляции данных только со спутника Terra. В летние месяцы модель без ассимиляции занижает значения ТПМ при сравнении с данными спутника SNPP. Наибольшее отклонение от данных спутника SNPP заметно в юго-западной и восточной части Чёрного моря, где оно достигает до 4–5 °С. С введением процедуры ассимиляции картина заметно меняется. При ассимиляции данных только одного спутника разность с контрольными данными (со спутника SNPP) удаётся уменьшить на 1–1,5 °С, а при ассимиляции одновременно с обоих спутников — на 2–2,5 °С. Более сильное влияние ассимиляции в летние месяцы может быть объяснено тем, что в этот период количество данных, приходящихся на каждую точку сетки, максимально. В осенние месяцы повторяется картина весенних месяцев, когда при расчёте по модели без ассимиляции разность с контрольными данными в некоторых частях моря может достигать до 3 °С, причём на востоке экватории Чёрного моря температура занижается, а в юго-западной и центральной части — завышается на ту же величину. При расчёте с ассимиляцией удаётся уменьшить ошибку до 1–1,5 °С. Таким образом, введение процедуры ассимиляции позволяет значительно улучшить воспроизведение моделью ТПМ, что, несомненно, улучшает прогностические свойства модели. Однако было заме-

чено, что усвоение только ТПМ за один год незначительно влияет на другие динамические величины системы. Следовательно, для более качественного воспроизведения гидродинамических характеристик в рассматриваемой акватории требуется как модификация самой модели, так и более длительные расчёты с ассимиляцией данных, а также привлечение дополнительной информации, например с буёв-дрифтеров, стационарных платформ и т. д. Отметим, что применённая выше процедура усвоения данных наблюдений может быть расширена на одновременную ассимиляцию данных с нескольких источников.

Заключение

В настоящей работе приведены результаты численных экспериментов по исследованию влияния ассимиляции данных оперативных наблюдений дистанционного зондирования на воспроизведение температуры поверхности моря в численной модели гидротермодинамики Чёрного и Азовского морей для разных наборов данных наблюдений. Проведены расчёты по модели без блока усвоения и с усвоением данных наблюдений только спутника Aqua, только спутника Terra и одновременной ассимиляции со спутников Aqua и Terra. Результаты экспериментов сравнивались с данными наблюдений спутника SNPP. Сравнение показало, что как при ассимиляции информации только одного спутника, так и одновременно двух спутников использование блока ассимиляции позволяет получать более близкие поля ТПМ к данным наблюдений спутника SNPP, чем при расчёте по модели без усвоения. Причём даже при ассимиляции данных только с одного спутника результаты расчётов оказываются лучше, чем по модели без усвоения. Наиболее это было заметно в летние месяцы, так как именно в этот период количество данных наблюдений как спутника Aqua, так и спутника Terra максимально. В осенние и зимние месяцы расчёты по модели незначительно отклоняются от данных наблюдений, однако и в этом случае расчёты с блоком ассимиляции данных показывают лучшее совпадение с данными наблюдений.

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. *Беляев К. Р., Кулешов А. А., Тучкова Н. П., Танажура К. А.* Метод коррекции расчетов динамической модели данными наблюдений и его применение в океанологии // *Мат. моделирование*. 2015. Т. 27. № 12. С. 20–32.
2. *Беляев К. П., Кулешов А. А., Смирнов И. Н.* Анализ результатов моделирования динамики океана с применением различных методов усвоения данных наблюдений // *Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша*. 2018. № 37. 17 с. DOI: 10.20948/prepr-2018-37.
3. *Захарова Н. Б., Шевченко Б. С.* Контроль данных дистанционного зондирования о температуре поверхности Чёрного и Азовского морей // *Региональные проблемы дистанц. зондирования Земли: материалы 10-й Международ. науч. конф.* 12–15 сент. 2023, Красноярск / науч. ред. Е. А. Ваганов; отв. ред. Г. М. Цибульский. 2023. С. 89–92.
4. *Захарова Н. Б., Пармузин Е. И., Лёзина Н. Р. и др.* Реанализ гидрофизических полей на основе ассимиляции данных ЦКП «ИКИ Мониторинг» в модели гидротермодинамики Чёрного, Азовского и Мраморного морей // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19. № 6. С. 63–75. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-63-75.
5. *Зеленько А. А., Вильфанд Р. М., Реснянский Ю. Д. и др.* 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.
6. *Кортаев Г. К., Лишаев П. Н., Кныш В. В.* Восстановление трехмерных полей солёности и температуры Черного моря по данным спутниковых альтиметрических измерений // *Исслед. Земли из космоса*. 2016. № 1–2. С. 199–212. DOI: 10.7868/S0205961416010073.

7. Лишаев П. Н., Кныш В. В., Коротаев Г. К. Восстановление гидрофизических полей Черного моря с ассимиляцией поверхностной температуры и псевдоизмерений температуры, солёности в модели // Морской гидрофиз. журн. 2020. Т. 36. № 5. С. 485–500. DOI: 10.22449/0233-7584-2020-5-485-500.
8. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашицкий 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.
9. Полонский А. Б., Серебренников А. Н. О механизме резкого понижения температуры поверхности в северо-западной части Чёрного моря и у побережья Крыма // Метеорология и гидрология. 2023. Т. 48. № 2. С. 31–40. DOI: 10.3103/S1068373923020036.
10. Фомин В. В., Дианский Н. А. Влияние способов усвоения спутниковых данных о температуре поверхности моря на воспроизведение гидрофизических полей Черного, Азовского и Мраморного морей в модели INMOM // Метеорология и гидрология. 2023. Т. 48. № 2. С. 15–30. DOI: 10.3103/S1068373923020024.
11. Шутяев В. П. Методы усвоения данных наблюдений в задачах физики атмосферы и океана // Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 17–34. DOI: 10.31857/S0002-351555117-34.
12. Agoshkov V. I., Zalesny V. B. Variational Data Assimilation Technique in Mathematical Modeling of Ocean Dynamics // Pure Applied Geophysics. 2012. V. 169. P. 555–578. DOI: 10.1007/s00024-011-0372-5.
13. Agoshkov V. I., Zalesny V. B., Shutyaev V. P. et al. Variational data assimilation for a sea dynamics model // Russian J. Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2022. V. 37. No. 3. P. 131–142. DOI: 10.1515/rnam-2022-0011.
14. Ciliberti S. A., Jansen E., Coppini G. et al. The Black Sea Physics Analysis and Forecasting System within the Framework of the Copernicus Marine Service // J. Marine Science and Engineering. 2022. V. 10. Article 48. DOI: 10.3390/jmse10010048.
15. Zalesny V. B., Diansky N. A., Fomin V. V. 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.

Investigation of the effect of assimilation of instantaneous satellite data on the reproduction of sea surface temperature in the Black and Azov Sea dynamics model

E. I. Parmuzin^{1,2}, N. R. Lezina¹, V. I. Agoshkov^{1,2}

¹ Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow 119333, Russia
E-mail: e.parmuzin@inm.ras.ru

² Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

The results of the effect of assimilation of operational remote sensing observation data on the reproduction of sea surface temperature in the Black and Azov Seas numerical model are presented. Sea surface temperature data, obtained via the IKI-Monitoring Center for Collective Use, from the Aqua, Terra and SNPP (Suomi National Polar-Orbiting Operational Environmental Satellite System (NPOESS) Preparatory Project) satellites are used as observation data in the numerical experiments. The choice of the heat flux at the sea surface as a control in the assimilation procedure allows assimilating the data at the current time without additional interpolation to the subdomains where observational data are absent at the time under consideration. The INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) mathematical model, developed at Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences, is used for numerical calculation. Results of numerical experiments with assimilation of sea surface temperature from Aqua and Terra satellites and comparison of calculations with the data from the SNPP satellite have confirmed the possibility to use the considered assimilation procedure in the numerical model and to construct realistic reanalysis fields of hydrothermodynamic quantities.

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

Accepted: 10.04.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-61-69

References

1. Belyaev K. P., Kuleshov A. A., Tuchkova N. P., Tanazhura K. A., A correction method for dynamic model calculations using observational data and its application in oceanography, *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2016, Vol. 8, No. 4, pp. 391–400, DOI: 10.1134/S2070048216040049.
2. Belyaev K. P., Kuleshov A. A., Smirnov I. N., Analysis of the results of ocean dynamics modeling using various methods of assimilation of observational data, *Keldysh Institute preprints*, 2018, Vol. 37, 17 p. (in Russian).
3. Zakharova N. B., Shevchenko B. S., Monitoring of earth remote sensing data on the surface temperature of the Black and Azov seas, *Regional'nye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli: materialy 10-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* (Regional Problems of Remote Sensing of the Earth: Proc. Conf.), 12–15 Sept. 2023, Krasnoyarsk, E. A. Vaganov, M. V. Noskov (eds.), 2023, pp. 88–92 (in Russian).
4. Zakharova N. B., Parmuzin E. I., Lezina N. R. et al., 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, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 6, pp. 63–75 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-63-75.
5. Zelenko A. A., Vil'fand R. M., Resnyanskii Yu. D. et al., An ocean data assimilation system and reanalysis of the world ocean hydrophysical fields, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, Vol. 52, No. 4, pp. 443–454, DOI: 10.1134/S0001433816040149.
6. Korotaev G. K., Lishaev P. N., Knysh V. V., Reconstruction of the Three-Dimensional Salinity and Temperature Fields of the Black Sea on the basis of Satellite Altimetry Measurements, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, Vol. 52, No. 9, pp. 961–973, DOI: 10.1134/S0001433816090152.
7. Lishaev P. N., Knysh V. V., Korotaev G. K., Reconstructing the Black Sea Hydrophysical Fields Including Assimilation of the Sea Surface Temperature, and the Temperature and Salinity Pseudo-Measurements in the Model, *Physical Oceanography*, 2020, Vol. 27, No. 5, pp. 445–459, DOI: 10.22449/1573-160X-2020-5-445-459.
8. Loupian E. A., Proshin A. A., Bourtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskiy A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sydneva 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).
9. Polonskii A. B., Serebrennikov A. N., On the Mechanism of a Dramatic Drop of the Sea Surface Temperature in the Northwestern Black Sea and Off the Crimean Coast, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2023, Vol. 48, pp. 109–115, DOI: 10.3103/S1068373923020036.
10. Fomin V. V., Diansky N. A., Methods of Assimilation of Sea Surface Temperature Satellite Data and Their Influence on the Reconstruction of Hydrophysical Fields of the Black, Azov, and Marmara Seas Using the Institute of Numerical Mathematics Ocean Model (INMOM), *Russian Meteorology and Hydrology*, 2023, Vol. 48, No. 2, pp. 97–108, DOI: 10.3103/S1068373923020024.
11. Shutyaev V. P., Methods for observation data assimilation in problems of physics of atmosphere and ocean, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, Vol. 55, No. 1, pp. 17–31, DOI: 10.1134/S0001433819010080.
12. Agoshkov V. I., Zalesny V. B., Variational Data Assimilation Technique in Mathematical Modeling of Ocean Dynamics, *Pure Applied Geophysics*, 2012, Vol. 169, pp. 555–578, DOI: 10.1007/s00024-011-0372-5.
13. Agoshkov V. I., Zalesny V. B., Shutyaev V. P. et al., Variational data assimilation for a sea dynamics model, *Russian J. Numerical Analysis and Mathematical Modelling*, 2022, Vol. 37, No. 3, pp. 131–142, DOI: 10.1515/rnam-2022-0011.
14. Ciliberti S. A., Jansen E., Coppini G. et al., The Black Sea Physics Analysis and Forecasting System within the Framework of the Copernicus Marine Service, *J. Marine Science and Engineering*, 2022, Vol. 10, Article 48, DOI: 10.3390/jmse10010048.
15. Zalesny V. B., Diansky N. A., Fomin V. V., 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.