

Двадцать третья международная конференция "СОВРЕМЕННЫЕ
ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ
КОСМОСА"

Исследование влияния длительности
периода вариационной ассимиляции данных
на воспроизведение температуры
поверхности моря

Пармузин Е.И., Агошков В.И., Шутяев В.П., Захарова Н.Б.,
Лезина Н.Р.

*Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука
Российской академии наук*

Разработка алгоритмов численного решения задач вариационной ассимиляции данных наблюдений и их верификация одна из актуальных задач математического моделирования в задачах окружающей среды.

❶ Используемые спутники:

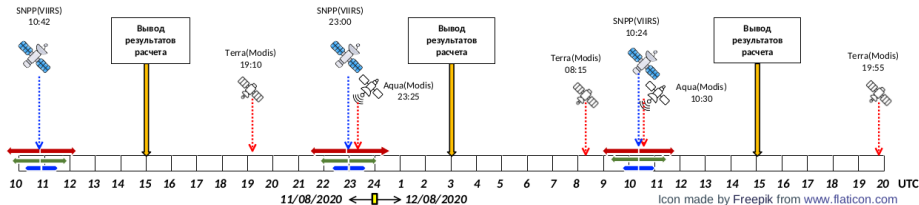
- в качестве ассимилируемой информации были выбраны данные со спутника SNPP (радиометр VIIRS).
- результаты расчёта по модели сравнивались с данными ТПМ со спутников Aqua, Terra (спектрорадиометр MODIS) и Sentinel (радиометр SLSTR).

❷ Варианты расчетов в численных экспериментах:

- Расчет по модели без ассимиляции.
- Расчет с усвоением спутника SNPP в шагах модели по времени: 1 шаг, 5 шагов, 11 шагов, 25 шагов, 51 шаг, 71 шаг (*пример: ассимиляция 5 шагов – 2 шага модели до пролета спутника и 2 шага модели после пролета*).
- Выводы результатов расчета: (а) каждые 3 часа, (б) каждые 6 часов, (в) во время пролета спутников над акваторией.

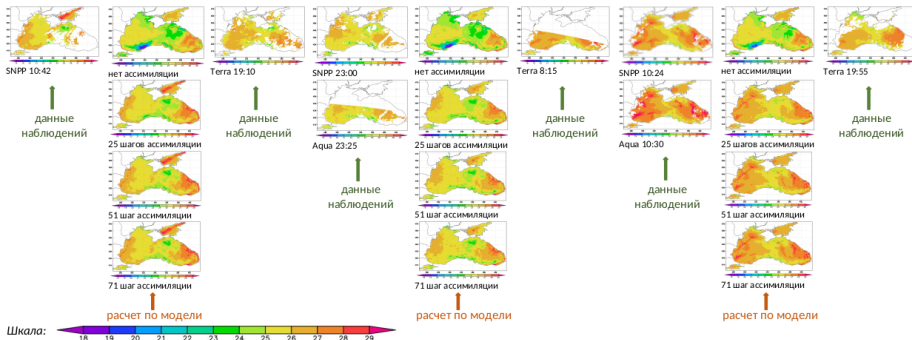
❸ Цель работы провести исследование влияния периода ассимиляции данных со спутников на воспроизведение температуры поверхности моря (ТПМ) при расчете по модели гидротермодинамики Черного, Азовского и Мраморного морей. Выявить особенности при ассимиляции ТПМ для различных регионов исследуемой акватории.

Эксперимент по исследованию продолжительности ассимиляции температуры поверхности моря с использованием данных наблюдений со спутников в модели гидротермодинамики Черного, Азовского и Мраморного морей



- ассимиляция в течение ± 87.5 минут от времени пролета спутника (71 шаг модели)
- ассимиляция в течение ± 62.5 минут от времени пролета спутника (51 шаг модели)
- ассимиляция в течение ± 30 минут от времени пролета спутника (25 шагов модели)

Температура поверхности моря, °C.



Особенности реализации численной модели

Для численных расчетов использовалась модель гидротермодинамики Черного и Азовского морей, разработанная в Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука (В.Б. Залесный, Н.А. Диаснский, А.В. Гусев, В.В. Фомин)¹:

❶ Особенности реализации модели

- σ -уровни по глубине (20 уровней);
- расщепление по физическим процессам;
- расщепление по координатам;

❷ Отдельные блоки для расчета температуры, солёности и циркуляции позволяют проводить как независимую ассимиляцию данных переменных модели по отдельности, так и одновременную ассимиляцию нескольких переменных.

¹ 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 // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling, 2012, Vol. 27, No. 1, pp. 95–111.

Вариационная ассимиляция ТПМ

Пусть дополнительной неизвестной (“управлением”) является функция полного потока Q . Введем функционал стоимости вида:

$$J_\alpha \equiv J_\alpha(Q, \phi) = \frac{1}{2} \int_0^{\bar{t}} \int_{\Omega} |\mathbf{Q} - Q^{(0)}| \mathcal{B}^{-1} |\mathbf{Q} - Q^{(0)}| d\Omega dt + J_0(\phi),$$
$$J_0(\phi) = \frac{1}{2} \int_0^{\bar{t}} \int_{\Omega} m_0 |T - T_{obs}| \mathcal{R}^{-1} |T - T_{obs}| d\Omega dt.$$

Здесь: $Q^{(0)} \equiv Q^{(0)}(\lambda, \theta, t)$ – заданная функция (которая может быть также и тривиальной), \mathcal{R}^{-1} – ковариационная матрица ошибок данных наблюдений, \mathcal{B}^{-1} – ковариационная матрица ошибок бэкграунда.

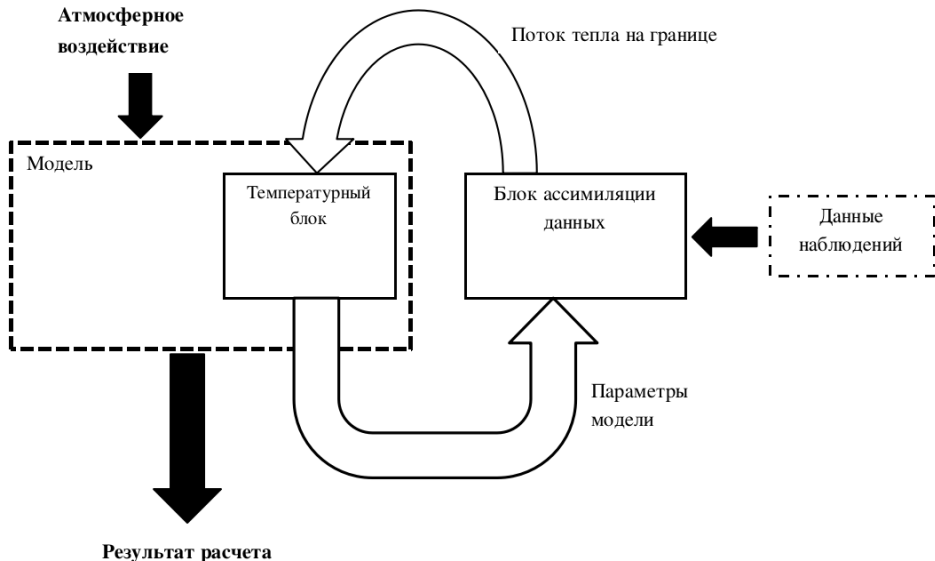
Задача вариационной ассимиляции формулируется следующим образом: *требуется найти решение T, S, ζ, u, v и функцию Q , такие, чтобы на них функционал принимал наименьшее значение.*

$$\left\{ \begin{array}{l} T_t + \frac{1}{2} \left(w_1 \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2 w_1 T)}{\partial z} \right) - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial z} r^2 \nu_T \frac{\partial T}{\partial z} = f_T, \quad T = T_0 \\ -\nu_T \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \textcolor{red}{Q}, \quad \nu_T \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0, \end{array} \right.$$

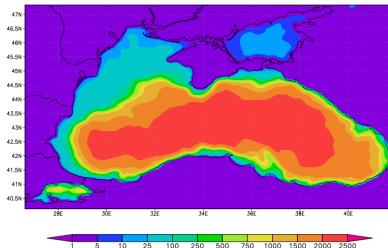
$$\left\{ \begin{array}{l} T_t^* - \frac{1}{2} \left(w_1 \frac{\partial T^*}{\partial z} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2 w_1 T^*)}{\partial z} \right) - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial z} \left(r^2 \nu_T \frac{\partial T^*}{\partial z} \right) = 0 \\ \nu_T \frac{\partial T^*}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0, \quad \left(-w_1 T^* - \nu_T \frac{\partial T^*}{\partial z} \right) \Big|_{z=0} = m_0 \mathcal{R}^{-1}(T - T_{\text{obs}}), \end{array} \right.$$

$$\mathcal{B}^{-1}(\textcolor{red}{Q} - Q^{(0)}) + T^* = 0$$

Схема расчета по модели с блоком ассимиляции данных



Параметры расчета и используемые данные

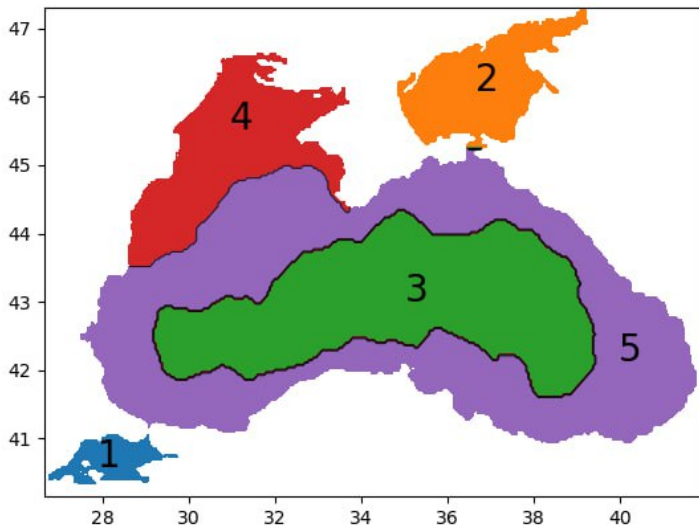


Моделируемая акватория, глубина в метрах

Параметры расчетной области:

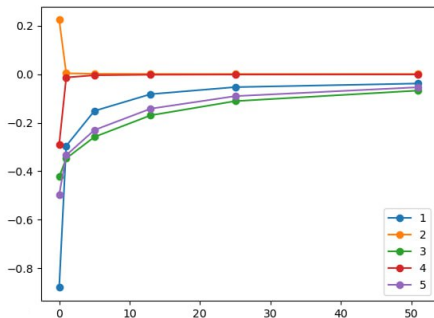
- сетка 306x200x20 точек (широта×долгота×глубина);
- первая точка сетки 26.65° восточной долготы и 40.15° северной широты.
- Шаги сетки по x и по y 0.05 и 0.036 градуса. Шаг по времени $\Delta t = 150$ секунд.
- В качестве T_{obs} использовались данные ТПМ Черного и Азовского морей со спутника SNPP. В качестве $Q^{(0)}$ использовался среднеклиматический поток, полученный по данным реанализа.
- Расчет включал в себя ассимиляцию T_{obs} и расчет по модели с 15.07.2020 по 15.08.2020.

Разбивка на регионы

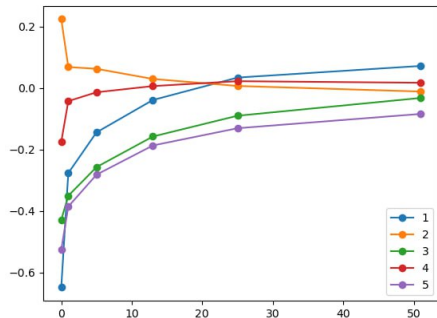


Разность среднемесячных значений ТПМ, посчитанных с различными периодами ассимиляции (1, 5, 13, 25, 51 шагов модели) спутника SNPP и данными наблюдений со спутников для различных регионов.

Вывод результатов расчета производится в момент получения данных со спутников.

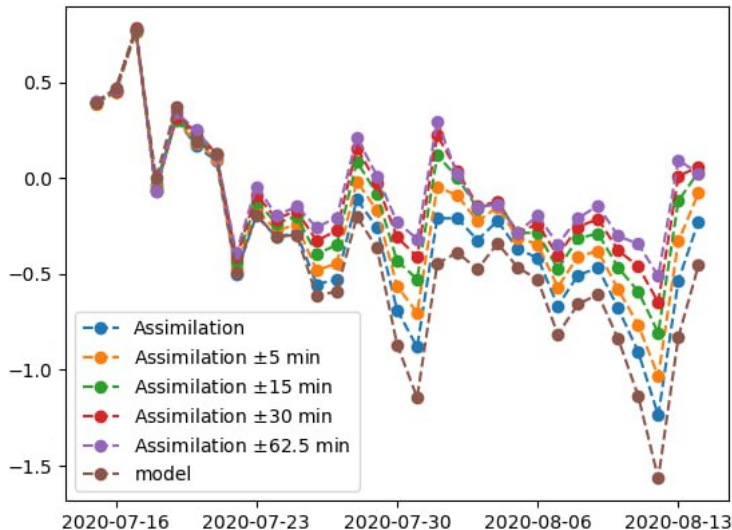


(а) Разность расчета ТПМ с наблюдениями со спутника SNPP, °C

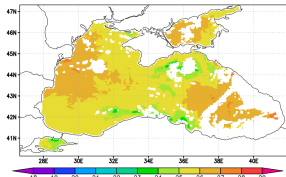


(б) Разность расчета ТПМ с наблюдениями со спутников Aqua, Terra и Sentinel, °C.

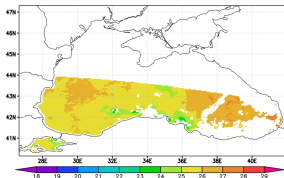
Разность среднесуточных значений ТПМ, рассчитанных по модели с разными периодами ассимиляции и данными наблюдений со всех спутников (Aqua,Terra,SNPP,Sentinel), °C.



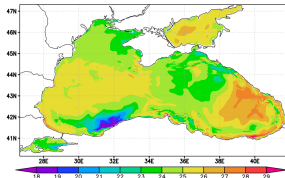
Результаты расчета ТПМ по модели на 3 часа UTC 12.08.2020 и ближайшими данными наблюдений со спутников, °С.



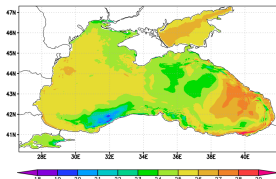
(a) SNPP, 11.08, 23:00 UTC



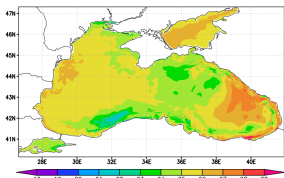
(b) Aqua, 11.08, 23:25 UTC



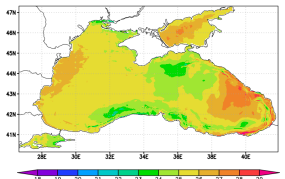
(c) Без ассимиляции



(d) Ассимиляция 1 шаг

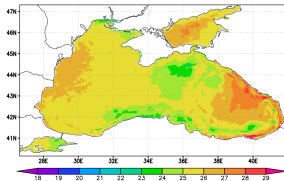


(e) Ассимиляция 5 шагов

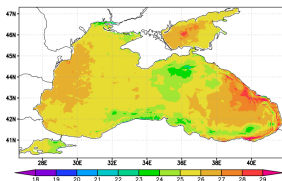


(f) Ассимиляция 13 шагов

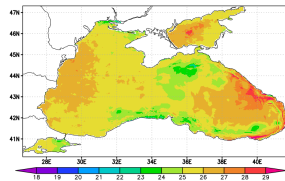
Результаты расчета ТПМ по модели на 3 часа UTC 12.08.2020, °C.



(a) Ассимиляция 25 шагов



(b) Ассимиляция 51 шаг



(c) Ассимиляция 71 шаг

Выводы по результатам исследований I.

- 1 Использование блока ассимиляции и позволяет получать более близкие поля ТПМ к данным наблюдений, чем при расчете по модели без усвоения. Даже при ассимиляции данных только одного спутника, результаты расчетов оказываются лучше, чем расчет по модели без усвоения.
- 2 Использование процедуры вариационной ассимиляции с управлением потоком тепла на границе позволяет варьировать период ассимиляции данных с отдельных спутников.
- 3 Для относительно мелководных участков моря, таких как северо-западный шельф Черного моря (до 300 метров) и Азовское море (до 12 метров) достаточно небольшого количества шагов ассимиляции для получения приемлемой точности (менее $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Выводы по результатам исследований II.

- 1 Для глубоководной части Черного моря (более 2000 метров) и части от 500 до 2000 метров более близкое к данным наблюдений поле ТПМ получается при длительной ассимиляции. Так при 51 шаге ассимиляции разность с данными наблюдений со всех спутников не превышает 0.2°C .
- 2 Сравнение среднесуточных значений рассчитанного поля по модели с ассимиляцией со среднесуточными данными со всех спутников (Aqua, Terra, SNPP, Sentinel) показывает, что более длительный период ассимиляции позволяет получать значения ТПМ близкие к данным наблюдения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-71-20035)