

Двадцать вторая международная конференция "СОВРЕМЕННЫЕ
ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ
КОСМОСА'

Вариационная Ассимиляция оперативных данных наблюдений со спутников в численной модели гидротермодинамики Черного и Азовского морей

Пармузин Е.И., Агошков В.И., Лезина Н.Р.

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

ИКИ РАН, Москва, 11-15 ноября 2024



Разработка и проверка алгоритмов численного решения задач вариационной ассимиляции данных наблюдений одна из актуальных задач современной вычислительной математики.

1 Критерии оценки качества и эффективности метода

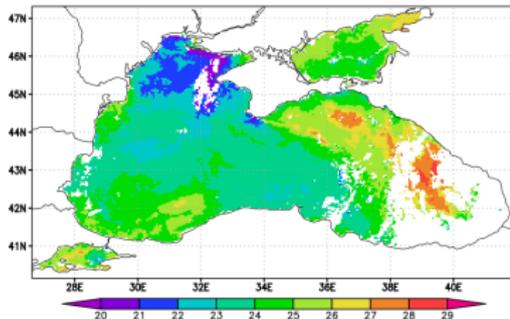
- Сравнение результатов расчетов с использованием метода вариационной ассимиляции данных наблюдений и без его применения.
- Проведение сравнения с различных источников данных, например, спутников с различными измерительными приборами, данными с буев, стационарных платформ т.д.

2 Используемые спутники:

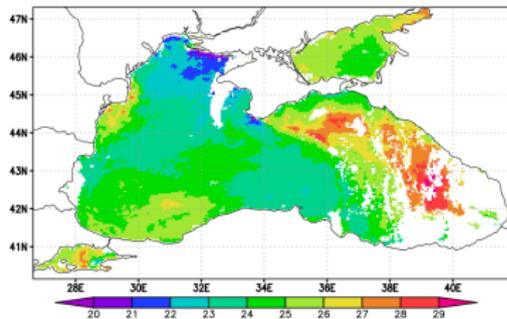
- в качестве ассимилируемой информации были выбраны данные со спутников Aqua и Terra (оснащённых спектрорадиометром MODIS)
- результаты расчёта по модели сравнивались с данными ТПМ со спутника SNPP (радиометр VIIRS)

3 Цель работы провести исследование влияния ассимиляции данных со спутников на воспроизведение температуры поверхности моря (ТПМ) при расчете по модели гидротермодинамики Черного, Азовского и Мраморного морей.

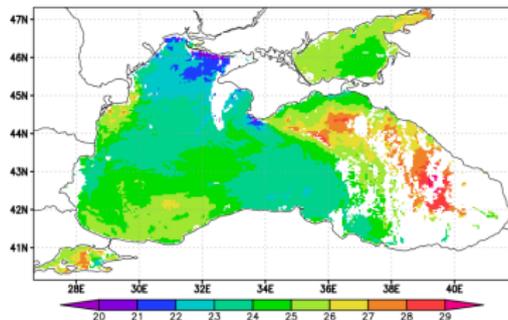
Примеры данных о ТПМ со спутников 28.06.2021, °C



(а) Спутник Terra, время наблюдения 8:45 UTC

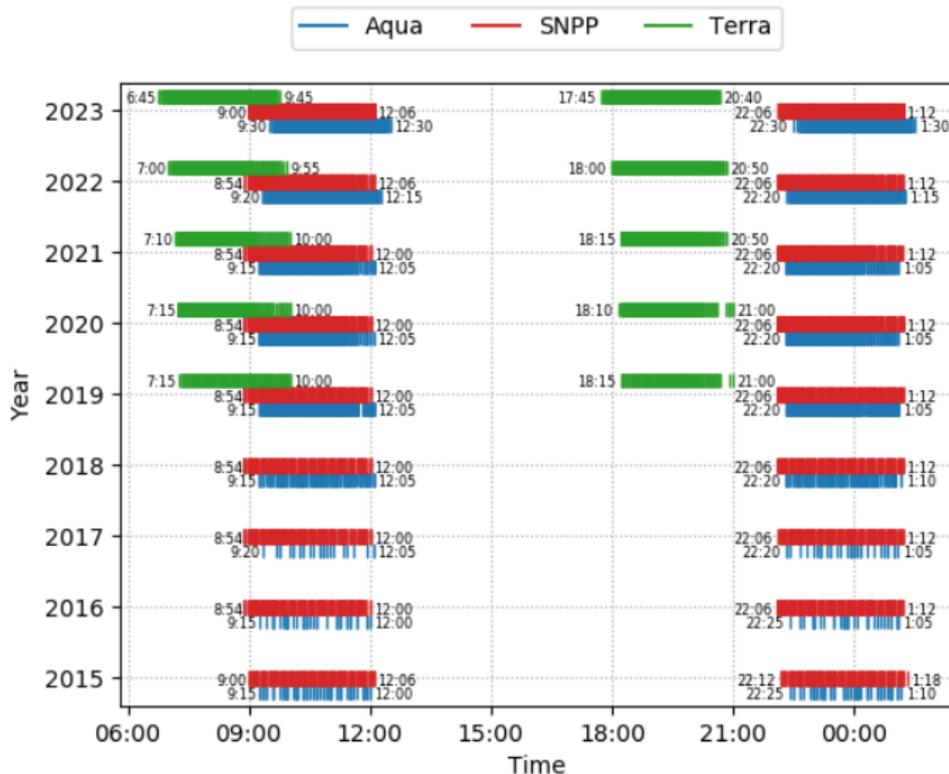


(б) Спутник Aqua, время наблюдения 10:30 UTC

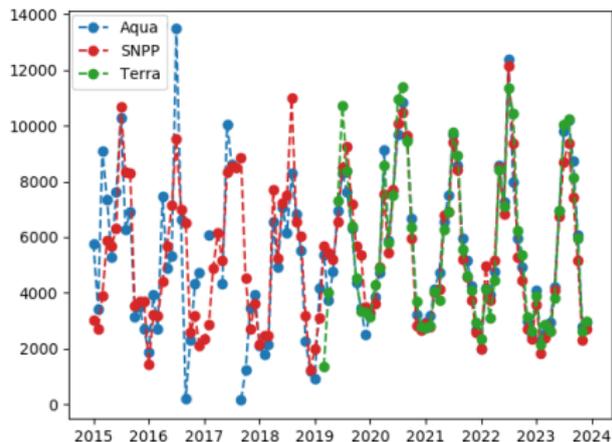
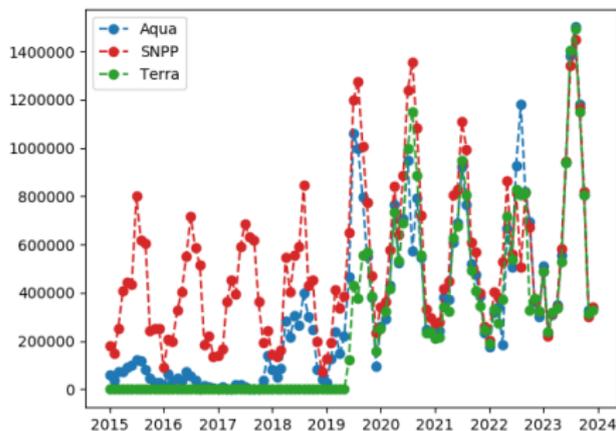


(с) Спутник SNPP, время наблюдения 10:24 UTC

Время пролета спутников над акваторией



Количество точек с данными на расчетной сетке для спутников Aqua, SNPP, Terra



(a) Общее количество точек по месяцам

(b) Среднее количество точек на снимке

Расчетных точек в исследуемой акватории: [29046](#).

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

- 1 Особенности реализации модели
 - σ -уровни по глубине (27 уровней);
 - расщепление по физическим процессам;
 - расщепление по координатам;
- 2 Отдельные блоки для расчета температуры, солёности и циркуляции позволяют проводить как независимую ассимиляцию данных переменных модели по отдельности, так и одновременную ассимиляцию нескольких переменных.

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

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

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.

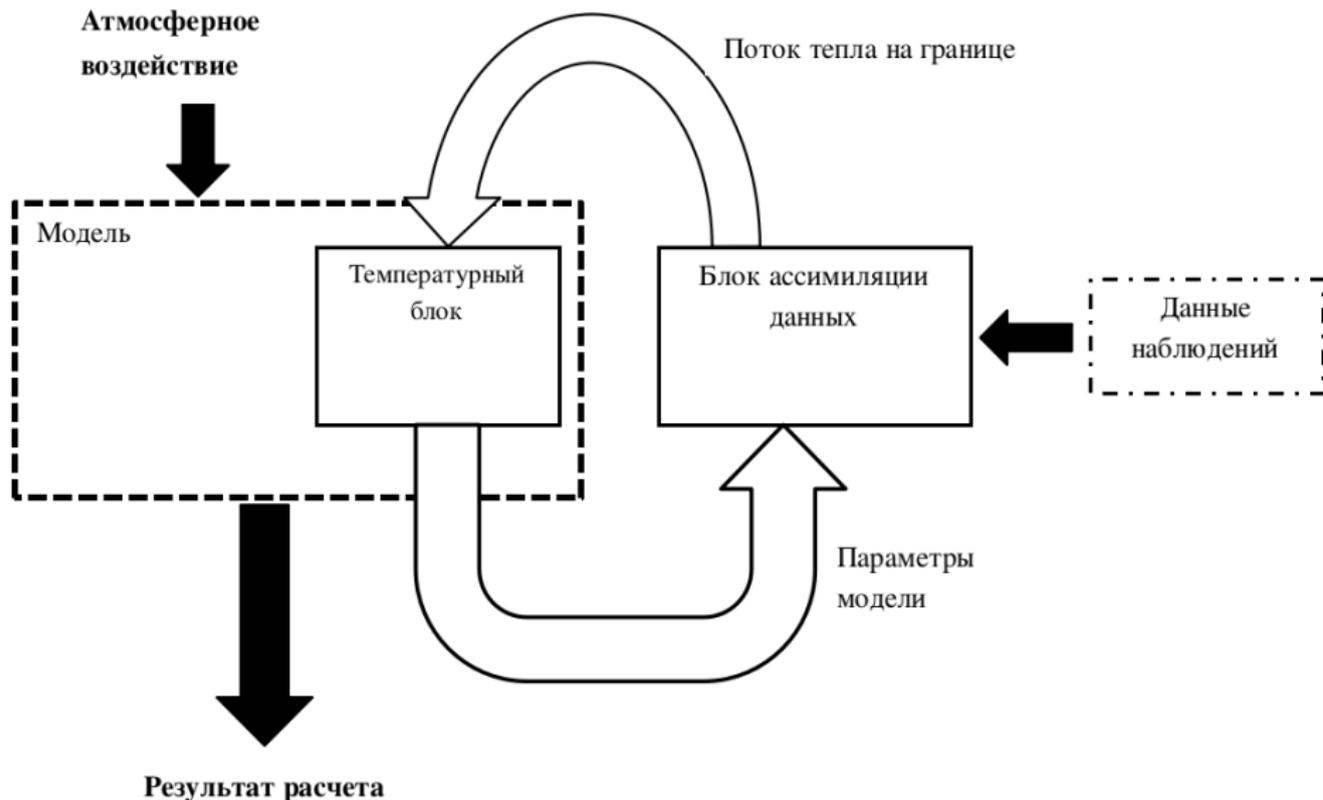
Задача вариационной ассимиляции формулируется следующим образом: *требуется найти решение T, S, ζ, u, v и функцию Q , такие, чтобы на них функционал принимал наименьшее значение.*

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

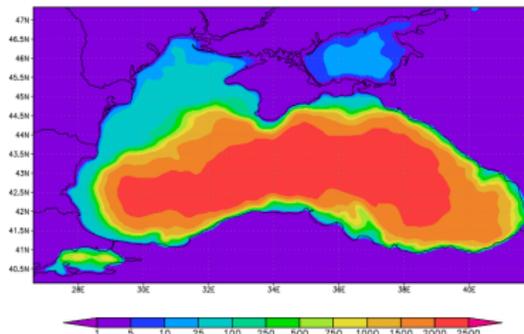
$$\left\{ \begin{array}{l} T_t^* - \frac{1}{2} \left(w_1 \frac{\partial T^*}{\partial z} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2 w_1 T^*)}{\partial z} \right) - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial z} \left(r^2 \nu_T \frac{\partial T^*}{\partial z} \right) = 0 \\ \nu_T \frac{\partial T^*}{\partial z} \Big|_{z=H}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

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

Схема расчета по модели с блоком ассимиляции данных



Вариационная ассимиляция. Черное море

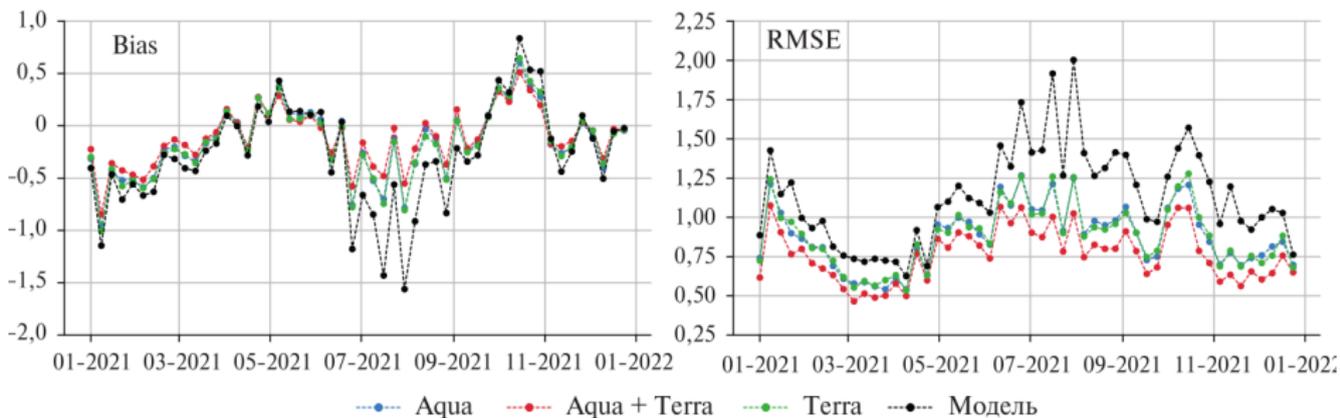


Моделируемая акватория, глубина в метрах

Параметры расчетной области:

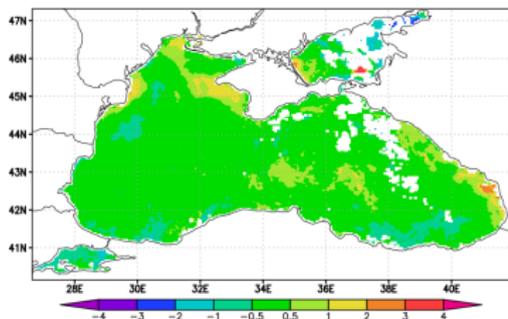
- сетка $306 \times 200 \times 27$ точек (широта \times долгота \times глубина);
- первая точка сетки 26.65° восточной долготы и 40.15° северной широты.
- Шаги сетки по x и по y 0.05 и 0.036 градуса.
- Шаг по времени $\Delta t = 2.5$ минут.
- В качестве T_{obs} использовались данные ТПМ Черного и Азовского морей со спутников AQUA, TERRA, SNPP.
- В качестве $Q^{(0)}$ использовался среднеклиматический поток, полученный по данным реанализа.
- Расчет включал в себя ассимиляцию T_{obs} и расчет сроком на 1 год.

Отклонение от среднего и среднеквадратичная ошибка

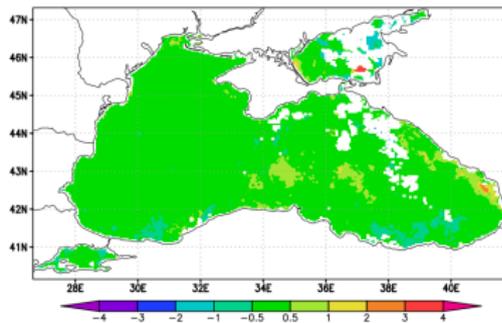


Значения bias и RMSE в 2021 г., где *Aqua* — результаты расчётов с применением ассимиляции данных со спутника *Aqua* (T_{Aqua}); *Aqua + Terra* — с ассимиляцией данных со спутников *Aqua* и *Terra* ($T_{Aqua+Terra}$); *Terra* — с ассимиляцией данных со спутника *Terra* (T_{Terra}); *Model* — без ассимиляции (T_{model}).

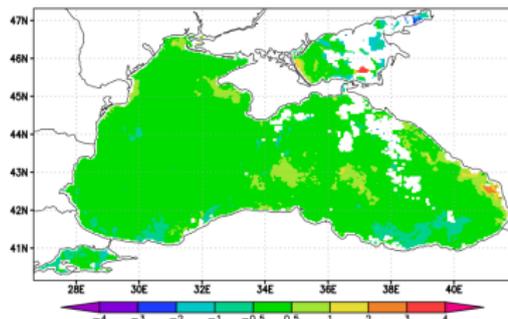
Среднее значения ТПМ с 9 по 15 апреля 2021 г., °C



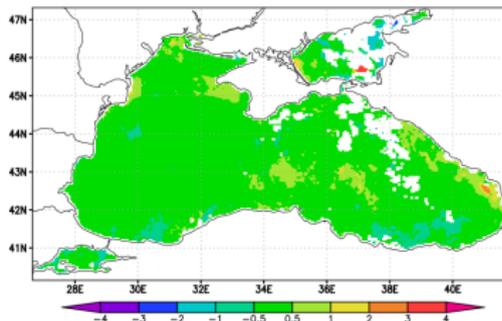
(a) $T_{SNPP} - T_{model}$



(b) $T_{SNPP} - T_{Aqua+Terra}$

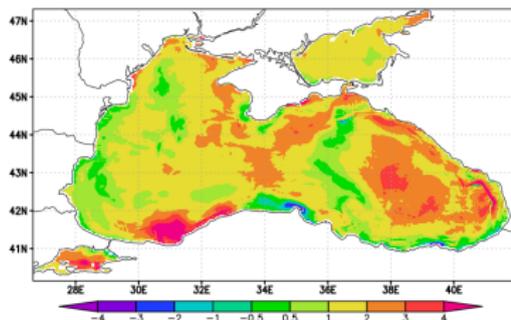


(c) $T_{SNPP} - T_{Aqua}$

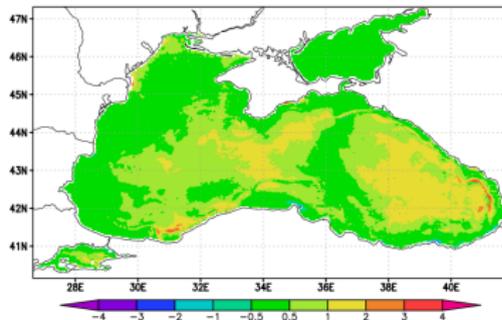


(d) $T_{SNPP} - T_{Terra}$

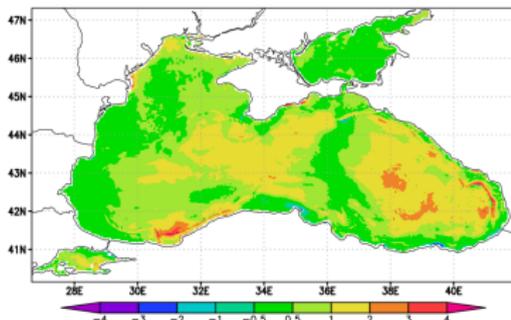
Среднее значения ТПМ с 30.07 по 5.08, 2021 г., °C



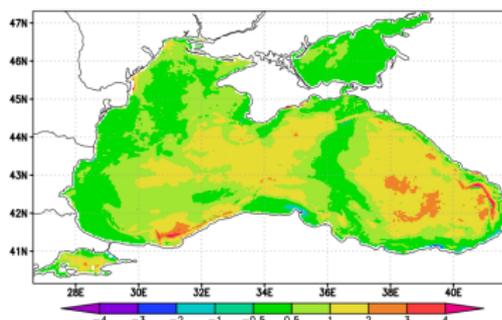
(a) $T_{SNPP} - T_{model}$



(b) $T_{SNPP} - T_{Aqua+Terra}$



(c) $T_{SNPP} - T_{Aqua}$



(d) $T_{SNPP} - T_{Terra}$

Анализ результатов численного расчета.

- 1 В зимние и весенние месяцы расчеты без ассимиляции и с ассимиляцией данных о ТПМ различаются незначительно.
 - При расчетах без усвоения данных наблюдается занижение температуры в прибрежных зонах на северо-западе и востоке акватории Черного моря, причем разница с контрольными данными (со спутника SNPP) может достигать до $2\text{ }^{\circ}\text{C}$.
 - С процедурой ассимиляции это отличие сокращается на $1\text{-}1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ при ассимиляции одновременно обоих спутников и на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ при ассимиляции только одного спутника.
- 2 В летние месяцы модель без ассимиляции значительно занижает ТПМ, при сравнении с данными спутника SNPP.
 - В юго-западной и восточной частях Черного моря отклонения от контрольных данных достигают до $4\text{-}5\text{ }^{\circ}\text{C}$.
 - При ассимиляции данных только одного спутника разность с контрольными данными удается уменьшить на $1\text{-}1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при ассимиляции одновременно обоих спутников на $2\text{-}2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 3 В осенние месяцы повторяется картина весенних месяцев.
 - При расчете без усвоения разность с контрольными данными может достигать до $3\text{ }^{\circ}\text{C}$, причем на востоке акватории Черного моря температура занижается, а в юго-западной и центральной части завышается.
 - При расчете с ассимиляцией удается уменьшить ошибку до $1\text{-}1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Выводы по результатам исследований

- 1 Использование блока ассимиляции и данных одновременно с обоих спутников (Aqua, Terra) позволяет получать более близкие поля ТПМ к данным наблюдений спутника SNPP, чем при расчете по модели без усвоения.
- 2 Даже при ассимиляции данных только одного спутника, результаты расчетов оказываются лучше, чем расчет по модели без усвоения.
- 3 Наиболее влияние ассимиляции было заметно в летние месяцы, так как именно в эти месяце количество данных наблюдений как спутника Aqua, так и спутника Terra максимально.
- 4 В осенние и зимние месяцы расчеты по модели незначительно отклоняются от данных наблюдений, однако и в этом случае расчеты с блоком ассимиляции данных показывают лучшее соответствие с данными наблюдений.
- 5 Введение процедуры ассимиляции данных позволяет значительно улучшить воспроизведение моделью ТПМ, что несомненно улучшает прогностические свойства модели.