



АЛТАЙСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ



Оценка эмиссии метана на территории Западной Сибири по данным спутникового спектрометра TROPOMI и химической модели GEOS-Chem

Лагутин А.А., Мордин Е.Ю.

ПРИ ГРАНТОВОЙ
ПОДДЕРЖКЕ
МИНОБРНАУКИ
РОССИИ



Актуальность

01

Метан (CH_4) является вторым по значимости антропогенным парниковым газом после CO_2 .

02

Западная Сибирь сочетает в себе источники метана (нефтегазовый комплекс, угольные разработки) и уязвимые природные экосистемы (болота, вечная мерзлота).

03

Существует значительный разрыв между данными "снизу-вверх" (инвентаризационные расчеты) и "сверху-вниз" (спутниковые наблюдения). Независимая количественная оценка необходима для верификации данных.

Цель доклада

Представить первые оценки эмиссии метана, полученные в результате ассимиляции данных спутникового спектрометра TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument) в химико-транспортную модель GEOS-Chem (Goddard Earth Observing System Chemistry Model).

Модель GEOS-CHEM

- Основана на данных Годдардской системы наблюдения за Землей (GEOS) управления глобального моделирования и ассимиляции NASA.
- Поддерживается Гарвардскими и Вашингтонскими университетами.
- GEOS-CHEM "Classic" и GCHP (GEOS-CHEM High Performance).
- Разрешение до $0.5^\circ \times 0.625^\circ$ и до 13 км для GEOS-FP.
- Вертикальных уровней 47 или 72.
- Обработка эмиссии – блок HEMCO.
- Эмиссия из баз CEDS, CEDSv2, HTAPv3, EDGAR, AEIC, GFED, ODIAC2019.
- Химический процессор – KPP: включает органические соединения, металлы, парниковые газы, оксиды азота, соединения серы, аэрозоли и т.д.
- Возможно моделирование во вложенной области.

Открытый
исходный код

Открытая
документация

Спутниковый спектрометр TROPOMI

- TROPOMI - TROpospheric Monitoring Instrument
- Европейский спутник Sentinel-5 Precursor (S5P), часть программы Copernicus
- Данные с апреля 2018 года
- Спектральные диапазоны :
 - UV-Visible: (270-500) nm;
 - Near-Infrared: (675-775) nm;
 - Shortwave Infrared: (2305-2385) nm.
- Пространственное разрешение 3.5 км x 5.5 км / 7.0 км x 5.5 км
- Ширина области сканирования ~ 2600 км
- NO₂, O₃, HCHO, SO₂, CO, **CH₄**, AOT, SIF, Clouds

Данные в открытом
доступе

Нет измерений **CH₄** над
снежной и водной
поверхностью

Пакет CHEEREIO

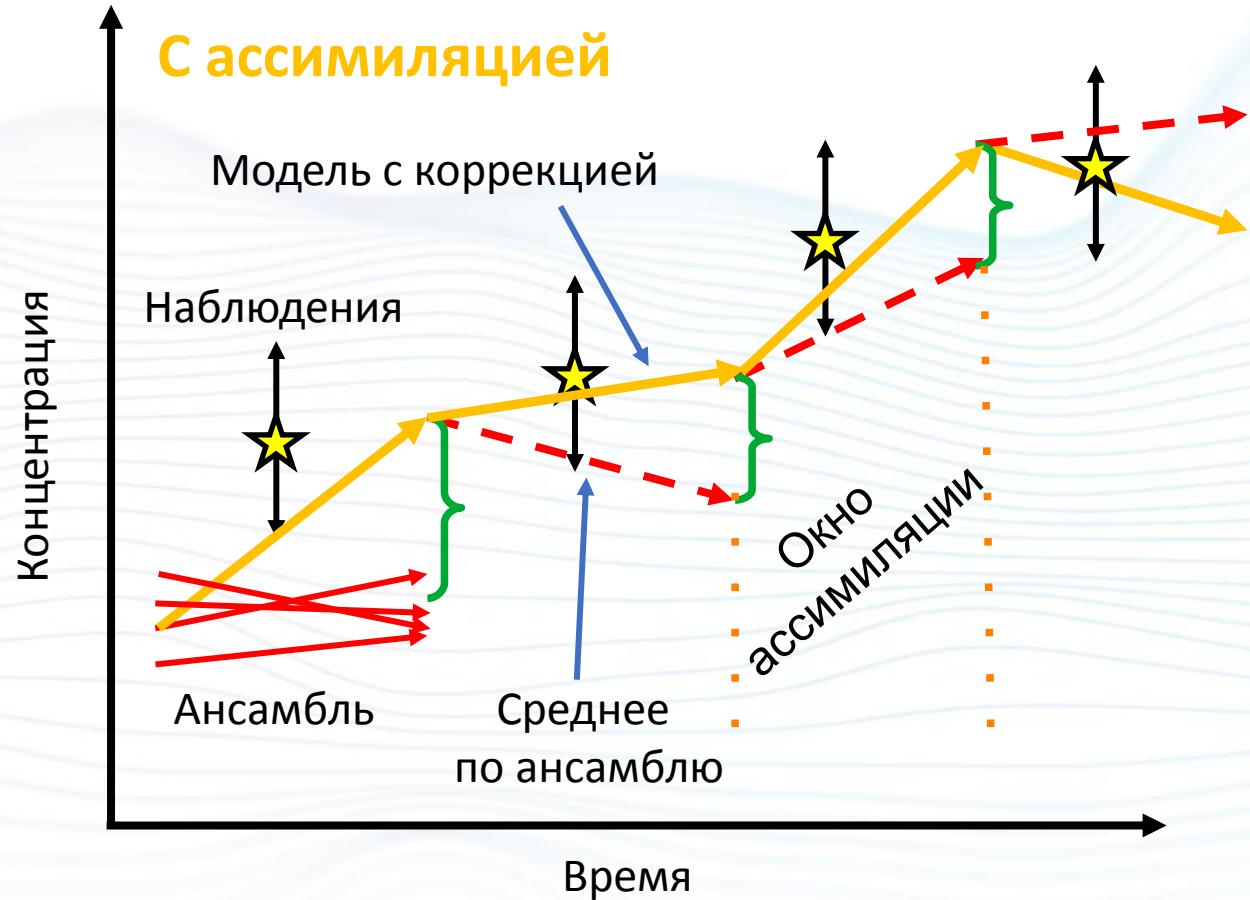
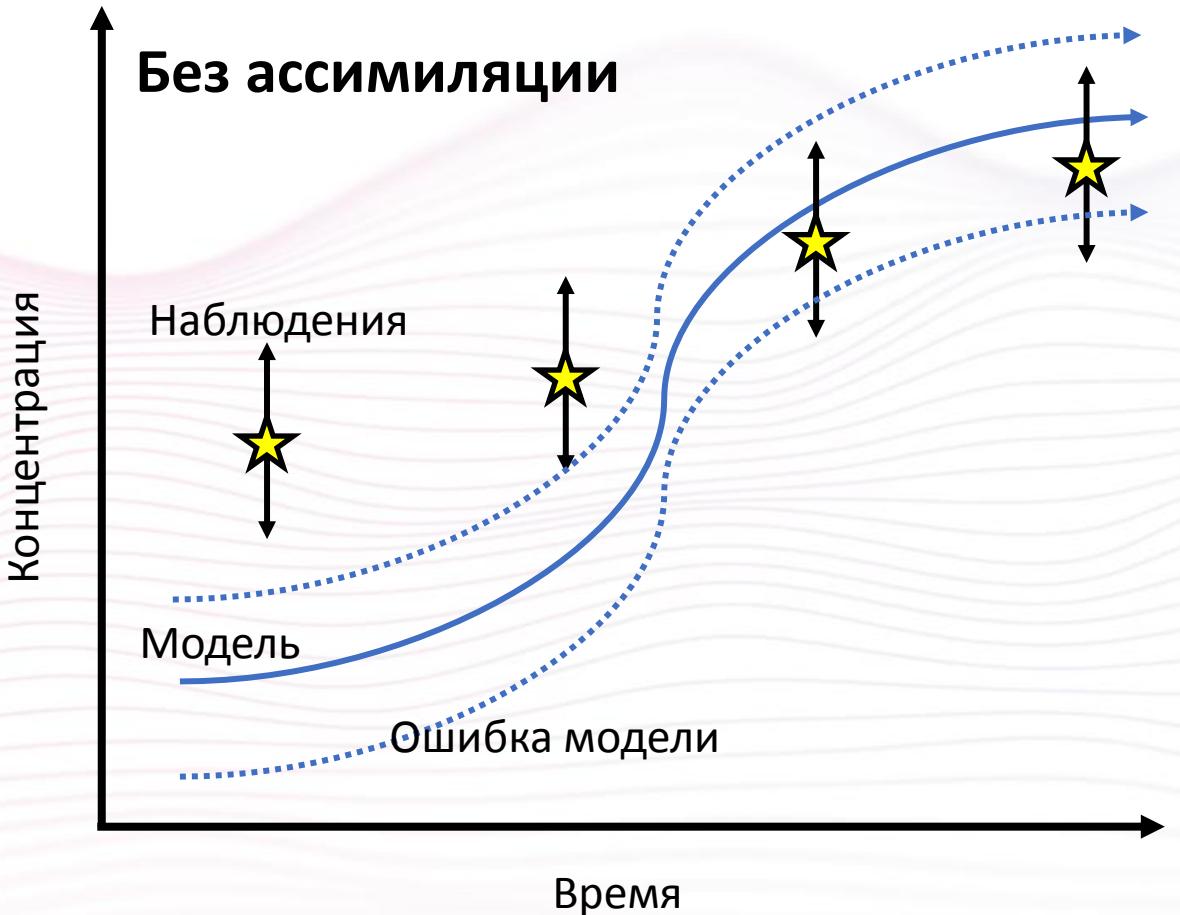


- CHEEREIO - Chemistry and Emissions Reanalysis Interface with Observations.
- Ассимиляции химических данных и инверсии выбросов для химической транспортной модели GEOS-Chem.
- Локализованный ансамблевый фильтр Калмана (Localized Ensemble Transform Kalman Filter, LETKF).
- Создан при помощи языка программирования Python.
- Включает операторы наблюдения TROPOMI, GOSAT, OMI.
- Относительно легко адаптировать для новых газовых компонентов.
- Два режима работы: для короткоживущих (CO) и долгоживущих (CO₂, CH₄) газовых компонентов.
- На порядок быстрее метода Аналитической инверсии.

Открытый
исходный код

Открытая
документация

АССИМИЛЯЦИЯ ДАННЫХ, АНСАМБЛЕВЫЙ ПОДХОД



1. Pendergrass D.C., Jacob D.J., Nesser H. et al (2023). CHEEREIO 1.0: A versatile and user-friendly ensemble-based chemical data assimilation and emissions inversion platform for the GEOS-Chem chemical transport model. *Geoscientific Model Development*, 16(16), 4793–4810. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-4793-2023>

АССИМИЛЯЦИЯ ДАННЫХ, МАТЕМАТИКА

$$x^a = x^b + K (y - H(x^b))$$

$$K = P^b H^T (H P^b H^T + R)^{-1} \quad x_i^a = x^a + \sqrt{(\tilde{P}^a)} \cdot (x_i^b - x^b)$$

x^a — апостериорная (скорректированная) оценка состояния, среднее по ансамблю.

x^b — априорная оценка вектора состояния.

y — вектор наблюдений.

K — матрица усиления Калмана.

P^b — априорная ковариационная матрица ошибок, описывающая неопределенность в x^b .

\tilde{P}^a — априорная ковариационная матрица ошибок в пространстве ансамбля.

R — Ковариационная матрица ошибок наблюдений.

$H(x)$ — оператор наблюдений, который проецирует вектор состояния x в пространство наблюдений.

1. Hunt B. R., Kostelich E. J., Szunyogh I. (2007). Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 230(1), 112–126. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2006.11.008>
2. Pendergrass D.C., Jacob D.J., Nesser H. et al (2023). CHEEREIO 1.0: A versatile and user-friendly ensemble-based chemical data assimilation and emissions inversion platform for the GEOS-Chem chemical transport model. *Geoscientific Model Development*, 16(16), 4793–4810. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-4793-2023>

Постановка эксперимента, железо

AMD 3970X, 32 ядра /
64 потока, 256 GB ОЗУ

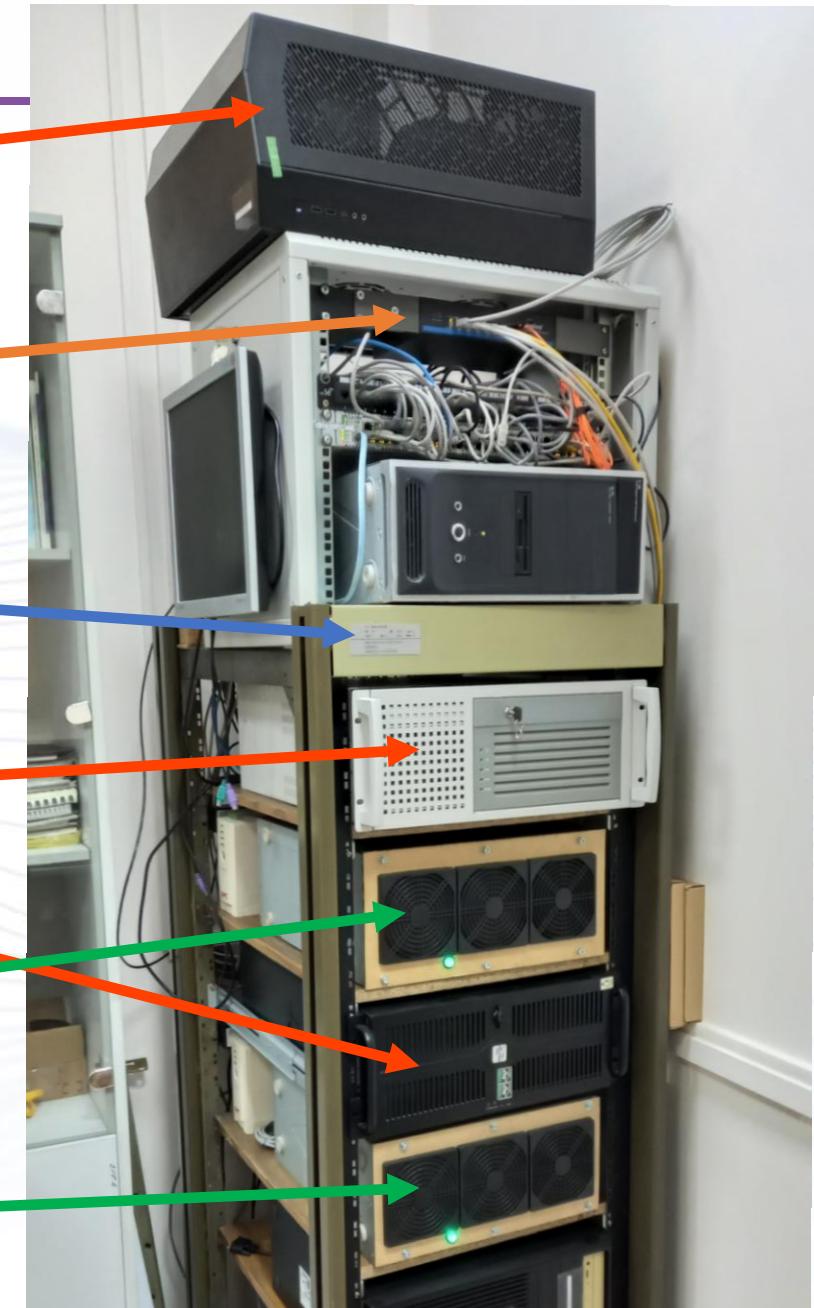
Сетевой коммутатор 10 GBit/s



Intel Xeon E5-2682 v4 x 2,
32 ядра / 64 потока, 128 GB ОЗУ

DIY NAS 56 ТБ, SSD Кэш,
входные данные

DIY NAS 110 ТБ, SSD Кэш,
выходные данные



Постановка эксперимента, конфигурация, модификации

1. Глобальные наблюдения — TROPOMI **CH₄** за 2019-2021 гг. (~ 1Тб)

2. Модель GEOS-CHEM версии 14.5.3:

- Разрешение модели $4^\circ \times 5^\circ$, 47 уровней,
- Химическая схема CH4-CO-CO2-OCS.

3. Пакет для ассимиляции CHEEREIO

и его модификация с целью:

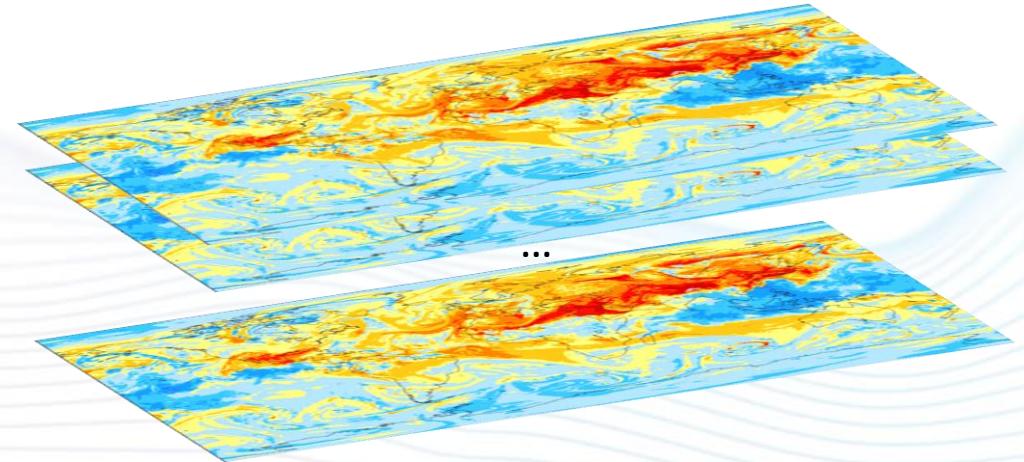
- сокращения потребления ОЗУ в ~ 5 раз,
- сокращения времени ассимиляции в ~ 15 раз.

- 
1. functools (partial) – разделение объектов
 2. multiprocessing (Pool) – параллельный препроцессинг
 3. joblib (Memory) – кэширование в ОЗУ
 4. NumPy numexpr в нагруженных вычислениях
 5. joblib (Parallel, Memory) для LETKF

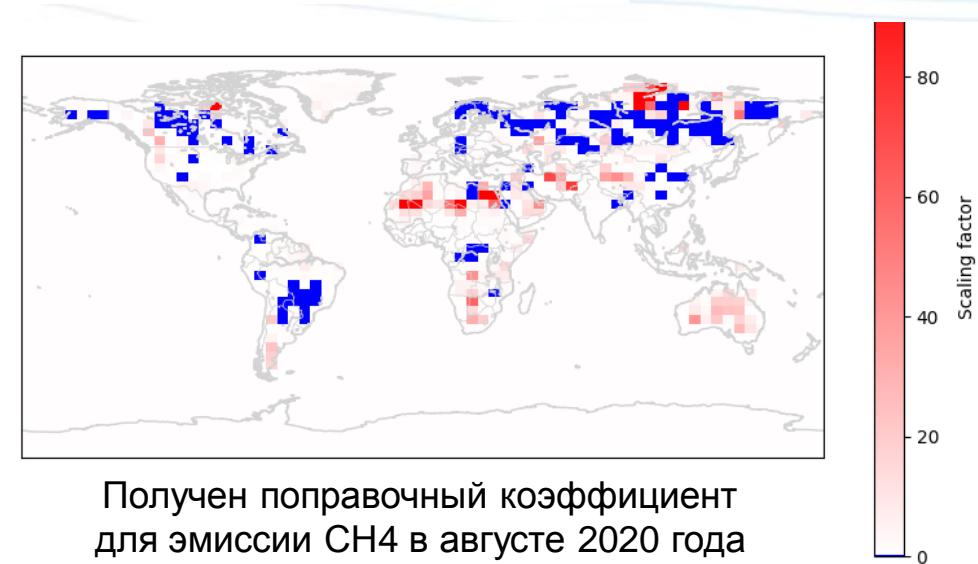
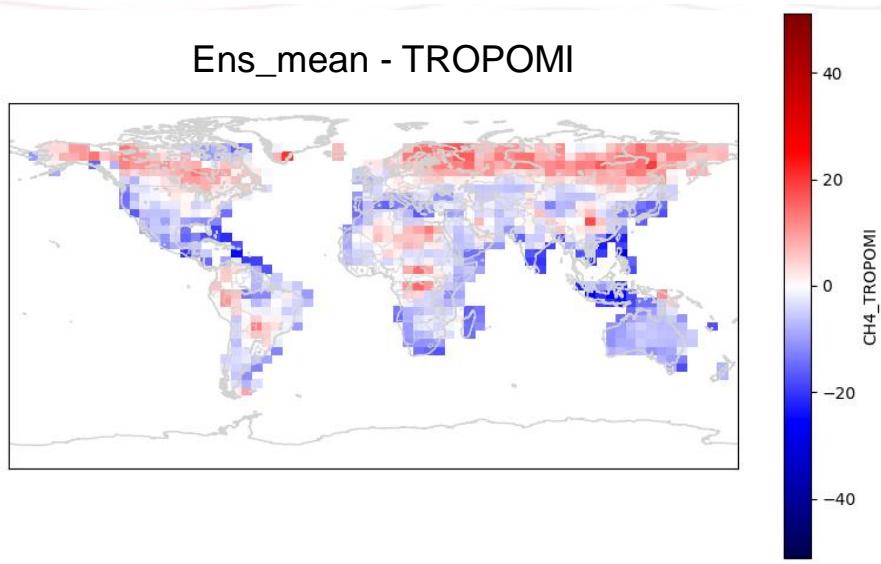
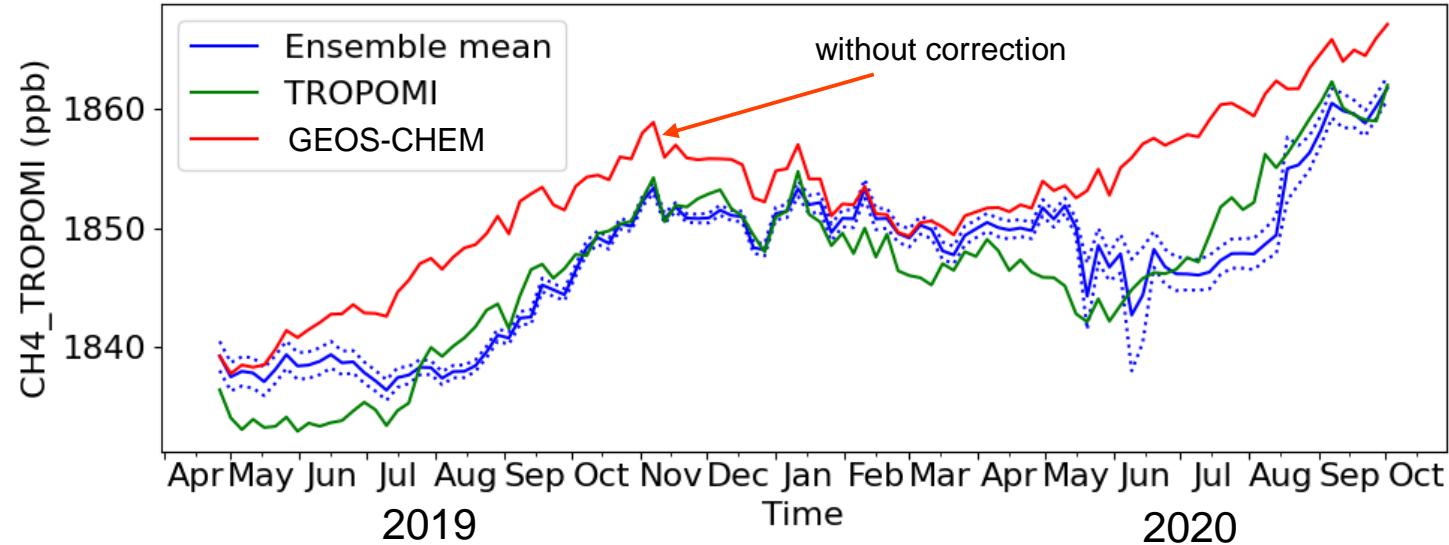
Постановка эксперимента, параметры ансамбля

Параметры ансамбля и ассимиляции:

- 32 элемента ансамбля + 1 без возмущения,
- Радиус локализации 1500 км.
- Период прогрева 2019-01-01 — 2019-04-01,
- Окно подгонки — 10 дней,
- Окно ассимиляции — 15 дней,
- Следующий шаг усвоения сдвинут
на 5 дней от предыдущего,



Контроль эксперимента

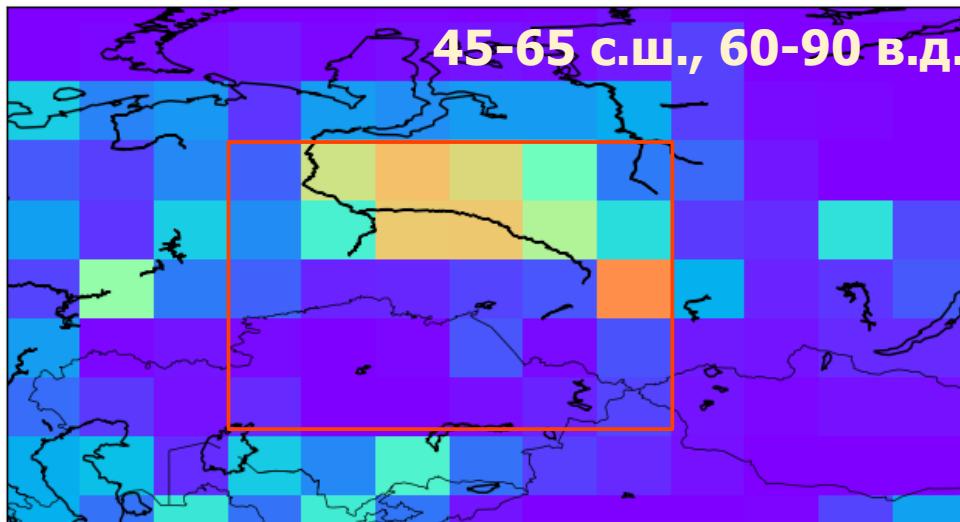


Получен поправочный коэффициент
для эмиссии CH₄ в августе 2020 года

ЭМИССИЯ МЕТАНА В 2020 ГОДУ ПО ДАННЫМ GEOS-CHEM

Без ассимиляции

Июль 2020 года

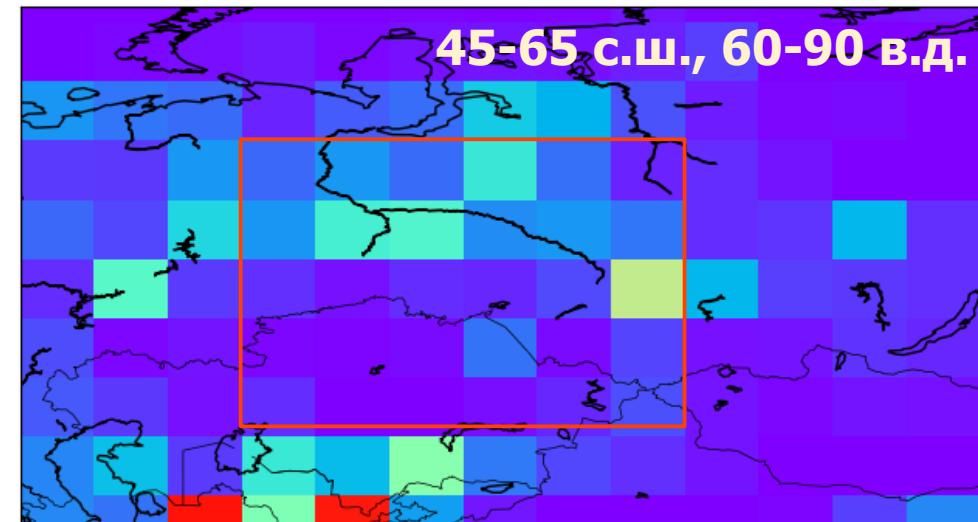


кг/(м²*с)

Эмиссия: июль ~ 17.9 Тг/год
январь ~ 6.2 Тг/год

С ассимиляцией данных TROPOMI

Июль 2020 года

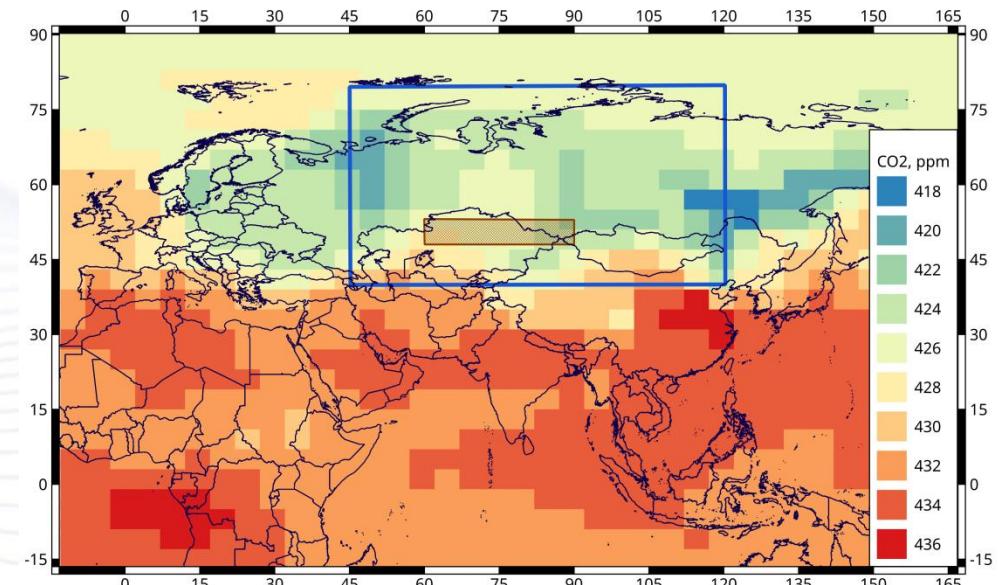


кг/(м²*с)

Эмиссия: июль ~ 15.2 Тг/год
январь ~ 6.8 Тг/год

Планируемые исследования

- Более аккуратная настройка модели:
 - увеличение элементов ансамбля до 48+1,
 - подбор параметров локализации,
 - фильтрация наблюдений.
- Работа с регионом Сибирь (40-80 с.ш., 45-120 в.д.)
с разрешением ~ 50 км;
- Добавление новых операторов наблюдения для приборов AIRS, IASI, CrIS.
- Внедрение адаптивной инфляции, например RTPS (Relaxation to Prior Spread).



Заключение

Развернут вычислительный комплекс для ассилияции данных спутникового спектрометра TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument) в химико-транспортную модель GEOS-Chem. Реализация метода выполнена на основе пакета с открытым исходным кодом CHEEREIO v.1.3.

В результате получена оценка эмиссии метана для территории Западной Сибири (45° – 65° с.ш., 60° – 90° в.д.) – около 11 Гт/год. Данная величина приблизительно на 15% ниже значений, заложенных в инвентаризационные базы данных GFEIv2 и EDGARv7, которые используются в GEOS-Chem по умолчанию. При этом полученная оценка превышает известные значения эмиссии метана природными экосистемами региона (4-6 Гт/год (Bohn, 2015)), что указывает на значительный вклад антропогенных источников.



АЛТАЙСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание на проведение научных исследований, выполняемых в АлтГУ, проект FZMW-2023-0007)

