

М. В. Платонова^{1✉}, В. Д. Котлер¹, Е. Г. Климова¹

Оценка приземной концентрации и эмиссии метана с поверхности Земли на основе применения алгоритма ансамблевого фильтра Калмана

¹Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: gumoznaya@gmail.com

Аннотация. В данной работе рассматривается система усвоения данных для оценки приземной концентрации и эмиссии метана с поверхности Земли на основе ансамблевого фильтра Калмана. В ходе исследования используются прогнозы глобальной модели переноса и диффузии в атмосфере и спутниковые данные для поиска оценки эмиссии в заданных регионах за заданные временные интервалы. Приводятся результаты численных экспериментов со спутниковыми данными AIRS. Предложенная методика позволяет точно выявлять области повышенной эмиссии метана для дальнейшего более детального анализа источников метана.

Ключевые слова: усвоение данных, эмиссия метана

M. V. Platonova^{1✉}, V. D. Kotler¹, E. G. Klimova¹

Estimation of surface methane concentration and emission using ensemble Kalman filter algorithm

¹Federal Research Center for Information and Computational Technologies,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: gumoznaya@gmail.com

Abstract. The paper presents a data assimilation system for estimating surface-level methane concentration and emissions from the Earth's surface, based on the ensemble Kalman filter. The approach combines forecasts from a global atmospheric transport and diffusion model with satellite observations to estimate methane emissions in specific regions over defined time intervals. The results of numerical experiments using AIRS satellite data are presented. The proposed methodology enables accurate identification of areas with elevated methane emissions, providing a basis for further detailed analysis of methane sources.

Keywords: data assimilation, methane emission

Введение

В условиях глобального изменения климата задача количественной оценки эмиссий парниковых газов, особенно метана, становится одной из ключевых в области мониторинга окружающей среды. Метан — высокоактивный парниковый газ, чья способность к поглощению теплового излучения делает его важным индикатором как естественных, так и антропогенных процессов в биосфере.

Одним из наиболее эффективных подходов к решению подобных задач является использование алгоритмов усвоения данных (data assimilation), интегри-

рующих данные наблюдений (например, спутниковые данные) с результатами расчётов модели атмосферы для получения оптимальной оценки состояния системы. Наиболее распространённые алгоритмы включают вариационные методы (4D-Var) и фильтры Калмана (в том числе ансамблевые модификации, EnKF).

Методы и алгоритмы

В данной работе рассматривается применение современных методов усвоения данных, в частности локального детерминированного ансамблевого фильтра Калмана [1–4], к задаче оценки приземной концентрации парниковых газов и поиск оценки эмиссии парникового газа на основе оценки приземной концентрации. Основной акцент сделан на оценке приземных концентраций метана с использованием спутниковых данных и результатов численного моделирования. На основе получаемых оценок приземных концентраций выполняется расчет пространственно-временного распределения эмиссии метана.

Для оценки эмиссии парниковых газов используется алгоритм, основанный на пересчёте приземной концентрации загрязняющих веществ в эмиссию, реализуемый на основе бокс-метода [5, 6]. Данный подход успешно применялся в ряде исследований, связанных с оценкой выбросов над урбанизированными территориями [5, 6].

Расчёт эмиссии F парниковых газов на единицу площади и времени осуществляется по формуле:

$$F = \Delta C_i \cdot H / \tau,$$

где:

ΔC_i — прирост приземной концентрации загрязняющего вещества по сравнению с фоновым уровнем,

H — высота слоя перемешивания,

τ — время изменения концентрации.

Значения H берутся из данных реанализа CAMS [7], что позволяет учитывать сезонную и региональную изменчивость атмосферных условий.

Для определения общего количества вещества Q , поступающего в воздушную массу над территорией площадью S , используется следующая формула:

$$Q = F \cdot S,$$

где F — локальная эмиссия;

S — площадь рассматриваемого участка.

В численных экспериментах для моделирования атмосферных процессов использовалась глобальная химико-транспортная модель MOZART-4 (Model for Ozone and Related chemical Tracers, version 4). Эта модель была разработана в рамках международного проекта Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP) и представляет собой инструмент для оценки вклада различных источников и атмосферных процессов в формирование распределения загрязняющих веществ. MOZART-4 включает более 100 химических

компонентов, включая озон, метан, оксиды азота, летучие органические соединения и другие. Модель распространяется как программное обеспечение с открытым исходным кодом, что делает её доступной для модификации и адаптации под конкретные задачи моделирования [8, 9].

В численных экспериментах использовались спутниковые данные, полученные с помощью инструмента AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) [8, 9]. AIRS позволяет получать данные о концентрациях углекислого газа, метана, озона, оксида азота, водяного пара и других компонентов атмосферы. Кроме того, в ходе численных экспериментов используются данные из базы реанализа CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service). Реанализ CAMS включает в себя трёхмерные поля концентраций атмосферных компонентов, температуры, давления и других метеорологических параметров.

Результаты экспериментов

Алгоритм оценки эмиссии парниковых газов с поверхности Земли по данным наблюдений с использованием глобальной модели переноса и диффузии включает несколько этапов:

1. Оценка проводится для заданного временного интервала, в течение которого значения приземной концентрации метана считается постоянной.
2. Разбиение поверхности Земного шара на подобласти: поверхность Земли разбивается на регионы, для каждого из которых проводится поиск оценки. При этом применяются локальные алгоритмы, позволяющие проводить вычисления независимо для каждой точки подобласти, что обеспечивает эффективность процесса поиска оценки.
3. Данные наблюдений разделяются на блоки по временным интервалам и подобластям.
4. Для объединения данных наблюдений и прогнозов по модели используется оператор интерполяции, который включает в себя прогноз по модели к моменту наблюдения и интерполяцию из узлов сетки в точки наблюдений.
5. Для получения оптимальной оценки приземной концентрации метана используются формулы ансамблевого локального детерминированного фильтра Калмана, которые комбинируют данные наблюдений и прогнозы по модели.

В рамках численных экспериментов были получены оценки приземных концентраций метана и рассчитаны на их основе оценки эмиссий в подобластях, расположенных на территории России, за летний месяц июнь за 2016 год. В качестве исходных данных использовались расчеты по модели MOZART-4, охватывающие интервал с 1 января по 25 июня 2016 года, а также спутниковые наблюдения AIRS за указанный период.

Оценка производилась с использованием усреднённых значений за семидневные интервалы. Территория была разбита на подобласти с площадью примерно 1000×1000 км. С учётом пространственного разрешения модели (основной шаг сетки составляет приблизительно 2.8°), в каждую подобласть входило около 8 узлов. Для повышения плотности пространственной оценки и проведения сопоставления со спутниковыми данными в модельную сетку были введены

дополнительные точки, что позволило увеличить разрешение до эквивалентного шага около 1.4° .

Для каждого узла сетки в радиусе 65 км отбирались соответствующие спутниковые измерения, после чего проводилось их осреднение. В рамках контроля качества исключались наблюдения, чьи значения значительно отклонялись от прогноза модели.

Для оценки эмиссии использовалось первое приближение, равное нулю (ввиду отсутствия достоверной априорной информации о распределении эмиссии). Генерация ансамбля возмущений для реализации алгоритма LETKF осуществлялась с использованием нормально распределённых случайных величин с нулевым средним и дисперсией 20 ppb.

В качестве ошибок наблюдений были заданы значения в 20 ppb, ошибки модели принимались равными 30 ppb. Эти значения выбраны на основании информации из документации и данных аналогичных исследований.

На рисунке представлена визуализация оценок эмиссии для некоторых регионов России за летний период (июнь 2016 года) (рис. 1). Для отображения пространственного распределения эмиссии использован градиент цвета, который позволяет выделить различные уровни интенсивности эмиссии. Чем ярче или насыщеннее цвет, тем выше интенсивность эмиссии в соответствующем регионе.

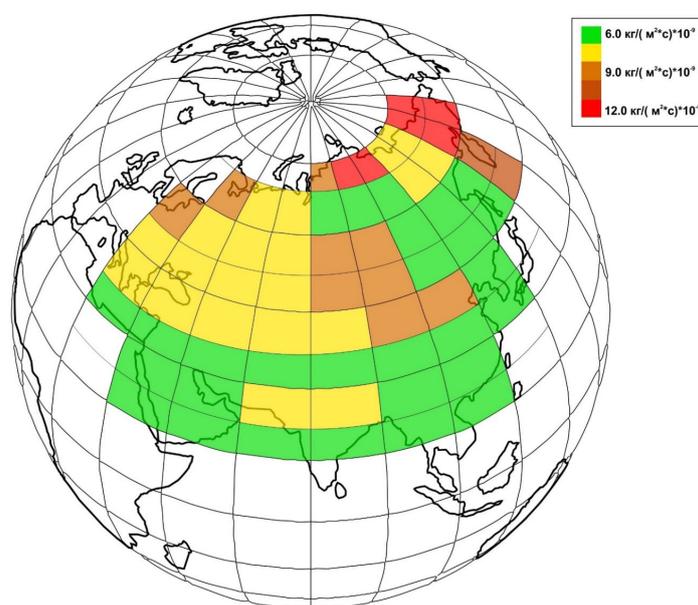


Рис.1. Оценка эмиссии метана по подобластям (средняя за июнь 2016 года)

Как демонстрирует рисунок, в пределах исследуемого региона зафиксирована значительная пространственно-временная изменчивость потоков этого газа. Такие колебания могут быть обусловлены не только наличием природных и ан-

тропогенных источников. Также следует учитывать неравномерное распределение источников эмиссий, включая промышленные предприятия, сельскохозяйственные комплексы и иные малодифференцированные источники, не учтённые в базовой конфигурации модели. Указанная вариативность в пространственном и временном поведении потоков метана подчёркивает необходимость более точной калибровки модели для отдельных территорий.

Заключение

В работе приводятся результаты численных экспериментов с реальными спутниковыми данными AIRS по оценке эмиссии метана с поверхности Земли. Обнаруженные особенности пространственной и сезонной динамики потоков метана подтверждают актуальность применения методов усвоения данных для оценки состояния атмосферы.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Климова Е. Г. Применение алгоритма ансамблевого сглаживания Калмана в задаче обратного моделирования для моделей переноса и диффузии // Сибирский журнал вычислительной математики. - 2024. - Т.27. - № 3. - С.287-302. DOI: 10.15372/SJNM20240303
2. Котлер В. Д., Платонова М. В., Климова Е. Г. Структура информационно-вычислительной системы для решения задачи усвоения данных при моделировании окружающей среды // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. - 2024. - Т.22. - № 1. - С.21-30. DOI: 10.25205/1818-7900-2024-22-1-21-30
3. Платонова М. В., Котлер В. Д., Климова Е. Г. Оценка приземной концентрации метана на основе алгоритма ансамблевого фильтра Калмана с привлечением транспортной химической модели // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. - 2024. - Т.22. - № 1. - С.62-72. DOI: 10.25205/1818-7900-2024-22-1-62-72
4. Платонова М. В., Котлер В. Д., Климова Е. Г. Сравнительный анализ распределения эмиссии метана в заданных регионах по спутниковым наблюдениям и расчетам по модели переноса и диффузии // Вычислительные технологии. - 2024. - Т.29. - № 4. - С.41-54. DOI: 10.25743/ICT.2024.29.4.004
5. Brasseur G. P. and Jacob D. J. Modeling of Atmospheric Chemistry Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2017.
6. Elansky N. F., Ponomarev N. A., Verevkin Y. M., Air quality and pollutant emissions in the Moscow megacity in 2005–2014, Atmos. Environ. 2018. -V. 175. P. 504–515. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.11.057>
7. CAMS reanalysis is in production <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/cams-global-reanalysis> – Электронные данные
8. Lagutin A. A., Mordvin E. Yu., Volkov N. V., Methane emission by petroleum industry in Western Siberia according to satellite observations // Atmospheric Physics. – 2021. - Vol. 119166N. DOI 10.1117/12.2603438
9. Lagutin A. A., Mordvin E. Yu., Volkov N. V., Regression model for reconstruction of the total methane content according to the data from AIRS hyperspectrometer and chemical transport model MOZART-4 // Atmospheric Physics. – 2023. - Vol. 1278062. DOI 10.1117/12.2690784.

© М. В. Платонова, В. Д. Котлер, Е. Г. Климова, 2025