

Научная статья

УДК 519.6

DOI 10.25205/1818-7900-2024-22-1-62-72

Оценка приземной концентрации метана на основе алгоритма ансамблевого фильтра Калмана с привлечением транспортной химической модели

Марина Владимировна Платонова¹

Василий Дмитриевич Котлер²

Екатерина Георгиевна Климова³

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,
Новосибирск, Россия

¹gumoznaya@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4359-8922>

Аннотация

В статье приводятся результаты численных экспериментов с модельными данными по оценке приземной концентрации метана на всей территории Земли. Имитация данных наблюдений для модельных экспериментов производилась по прогнозам модели переноса и диффузии MOZART-4. Приземная концентрация является значением, задаваемым на нижней границе модели. Ее изменение по времени характеризует эмиссию метана с поверхности Земли. Численные эксперименты с модельными данными проведены как с имитацией сети наземных измерений, так и с имитацией спутниковых наблюдений. Алгоритм поиска оценки приземной концентрации основан на использовании ансамблевого фильтра Калмана. Показано, что разработанный алгоритм позволяет оценивать значения приземной концентрации метана по данным наблюдений. Точность оценки зависит от распределения в пространстве и времени используемых данных измерений.

Ключевые слова

усвоение данных, оценка приземной концентрации метана, модельные эксперименты

Финансирование

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

Благодарности

Авторы статьи выражают глубокую благодарность коллегам профессору Анатолию Алексеевичу Лагутину и доценту Егору Юрьевичу Мордвину за предоставленные данные и полезные дискуссии.

Для цитирования

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 НГУ. Серия: Информационные технологии. 2024. Т. 22, № 1. С. 62–72. DOI 10.25205/1818-7900-2024-22-1-62-72

© Платонова М. В., Котлер В. Д., Климова Е. Г., 2024

Estimation of Surface Methane Concentration based on the Ensemble Kalman Filter Algorithm using a Transport Chemical Model

Marina V. Platonova¹, Vasily D. Kotler²
Ekaterina G. Klimova³

Federal Research Center for Information and Computational Technologies,
Novosibirsk, Russian Federation

¹gumoznaya@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4359-8922>

Abstract

The article presents the results of numerical experiments using model data to estimate ground-level methane concentrations using the MOZART-4 model. Various approaches to integrating observational data and their application to various scientific and practical applications are discussed, including monitoring and analysis of methane sources, both anthropogenic and natural. These results illustrate the practical use of data assimilation to collect statistical data on the dynamics of emissions activity in specific subregions, which can be useful for estimating activity levels and processing large data sets to identify the most interesting and potentially promising areas for obtaining more detailed data analysis.

Keywords

data assimilation, estimation of surface methane concentration, model experiments

Funding

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Russian Ministry of Education and Science for the Federal Research Center for Information and Computing Technologies.

Acknowledgements

The authors of the article express their gratitude to their colleagues Professor Anatoly Alekseevich Lagutin and Associate Professor Egor Yurievich Mordvin for the data provided and useful discussions.

For citation

Platonova M. V., Kotler V. D., Klimova E. G. Estimation of surface methane concentration based on the ensemble Kalman filter algorithm using a transport chemical model. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2024, vol. 22, no. 1, pp. 62–72 (in Russ.) DOI 10.25205/1818-7900-2024-22-1-62-72

Введение

Актуальность научных исследований в области мониторинга парниковых газов неоспорима. Метан является одним из основных парниковых газов и играет ключевую роль в глобальном потеплении и изменении климата. Его влияние на окружающую среду, как в атмосфере, так и на поверхности Земли, является предметом широкого научного интереса и обсуждений. Одним из современных методов, активно применяемых в области моделирования процессов в окружающей среде, является метод обратного моделирования. Методы обратного моделирования представляют собой совместное использование данных наблюдений и математической модели для получения оценки заданных величин. Усвоение данных представляет собой частный случай обратного моделирования, который включает последовательное получение оценок по времени на основе данных наблюдений [1].

Существуют два основных подхода к решению задачи усвоения данных: вариационный и динамико-стохастический. Вариационные методы базируются на поиске минимума функционала, описывающего отклонение модельного решения и данных измерений в заданной метрике [2; 3]. Динамико-стохастический подход основан на применении теории оценивания, в частности, фильтра Калмана. Реализация алгоритмов усвоения данных, основанных на фильтре Калмана, в задачах моделирования окружающей среды является сложной вычислительной задачей из-за высокой размерности используемых в алгоритме векторов и матриц. По этой

причине в настоящее время используются ансамблевые методы, такие как ансамблевый фильтр Калмана и ансамблевое сглаживание Калмана [4–12]. Использование данных спутникового наблюдения в системах усвоения данных обеспечивает широкий географический охват и непрерывный мониторинг состояния окружающей среды, в то время как результаты расчета моделей позволяют учитывать сложные физические и химические процессы, происходящие в атмосфере [13; 14]. Комбинируя эти источники информации, можно достичь получения оптимальной оценки концентраций парникового газа.

Современные методы оценки концентрации и эмиссии парниковых газов используют данные наблюдений, включая спутниковые, с высоким разрешением [15]. Эти методы основаны на усвоении данных и обратном моделировании. Однако такие методы требуют значительных вычислительных ресурсов, альтернативным подходом является использование ансамблевых методов, таких как ансамблевый фильтр Калмана и ансамблевое сглаживание Калмана [4–12; 16]. Эти методы являются технически более простыми в реализации и могут быть применены последовательно по времени. Большое количество работ посвящено оценке эмиссии парниковых газов на основе ансамблевого фильтра Калмана. Отметим работу [16], в которой приводятся результаты численных экспериментов с модельными данными по оценке эмиссии метана, при этом применяется алгоритм ансамблевого фильтра Калмана LETKF.

В настоящей работе представлены результаты численных экспериментов с модельными данными по оценке приземной концентрации метана с использованием транспортной химической модели MOZART-4 [4–7; 11–14]. Приземная концентрация метана является нижним граничным условием модели и ее изменчивость по времени характеризует динамику эмиссии метана с поверхности Земли. В работе используется алгоритм ансамблевого фильтра Калмана LETKF [16]. Описана реализация алгоритма для оценки приземной концентрации метана на поверхности Земного шара. Приводятся результаты численных экспериментов с модельными данными, при этом рассматриваются различные варианты задания модельных данных. Численные эксперименты с модельными данными являются важным этапом при разработке системы усвоения данных, они позволяют оценить эффективность системы усвоения данных и возможность оценивать требуемый параметр с заданной точностью.

Алгоритм ансамблевого фильтра Калмана

В данной работе применяется динамико-стохастический подход к задаче усвоения данных, который основан на использовании ансамблевого фильтра Калмана [17]. Ниже приводится описание используемого в численных экспериментах алгоритма ансамблевого фильтра Калмана LETKF.

Алгоритм усвоения данных применяется для оценки приземной концентрации метана и состоит из шага прогноза и шага анализа. Шаг анализа в общем случае имеет вид [4–7; 11; 12; 17]:

$$x_k^a = x_k^f + K_k[y_0^k - H(x_k^f)].$$

В этих формулах k – номер шага по времени, K_k – весовая матрица шага анализа, y_0^k – вектор данных наблюдений, x_k^f , x_k^a – значения, полученные на шаге прогноза и анализа, соответственно, H – оператор наблюдений:

$$y_0^k = H(x_t^k) + \varepsilon_0^k,$$

где x_t^k – «истинное» значение оцениваемой величины, ε_0^k – случайная ошибка наблюдений с нулевым математическим ожиданием и ковариационной матрицей R .

Считается, что на шаге прогноза оцениваемая переменная не меняется. Оценка производится для средних в заданном временном интервале значений. Отметим, что измеряемой переменной является концентрация метана на заданных уровнях по высоте. Для использования данных из большого временного интервала в оператор наблюдений включена модель переноса-диффузии.

В алгоритме LETKF на шаге анализа выполняется поиск оценки только для среднего по ансамблю значения, после чего вычисляется ансамбль значений анализов. Ниже представлены формулы, описывающие этап анализа алгоритма LETKF, для заданного момента времени k :

$$x_k^a = x_k^f + Dx_k^f \tilde{P}^a (HDx_k^f)^T R_k^{-1} [y_0^k - h(x_k^f)],$$

$$\tilde{P}^a = [(N-1)I + (HDx_k^f)^T R_k^{-1} HDx_k^f]^{-1},$$

где I – единичная матрица, N – размерность ансамбля, Dx_k^f – ансамбль ошибок прогноза, нормированных на $\sqrt{N-1}$, H – линеаризованный оператор наблюдений [16].

В рассматриваемом алгоритме для вычисления оценки производится прогноз по модели переноса-диффузии N элементов ансамбля прогнозов по заданному возмущению приземной концентрации. По ансамблю прогнозов вычисляется соответствующий ансамбль ошибок прогноза и оценка искомой величины.

В проводимых численных экспериментах с использованием данного алгоритма необходимо вводить контрольные механизмы для обеспечения стабильности и эффективности работы. С этой целью на этапе расчетов проводилась оценка следа ковариационной матрицы, и при несоответствии с установленным порогом применялся механизм коррекции (inflation factor). Этот механизм представляет собой процесс, при котором ковариационная матрица ошибок умножается на определенный коэффициент (в данном случае 1.1) до тех пор, пока матрица не будет удовлетворять требуемым критериям [16].

Организация численных экспериментов с модельными данными

Для численных экспериментов с модельными данными использовалась глобальная модель MOZART-4 [11–14]. В качестве реального («истинного») состояния системы были использованы данные о расчетах концентраций газов за 2016 г. Численное моделирование проводилось для всего Земного шара с использованием сетки модели с разрешением 2,8 градуса (стандартная сетка T-42).

Численные эксперименты с модельными данными являются общепринятой практикой и применяются для отладки системы усвоения данных и оценки ее эффективности. При этом задается «истинное» значение оцениваемых и моделируемых величин. Модельные данные получаются путем добавления к «истинному» значению случайных возмущений с нормальным распределением (с нулевым математическим ожиданием и заданной дисперсией), которые моделируют ошибки наблюдений в реальных данных. Для вычисления прогноза значение концентрации в приземном слое увеличивалось равномерно во всей поверхности Земного шара. Важно отметить, что как ошибка наблюдений, так и введенная погрешность концентрации метана в модельных экспериментах были выбраны и настроены таким образом, чтобы соответствовать смыслу физических аналогов в экспериментах с реальными данными.

В статье представлен численный эксперимент с модельными данными для процедуры усвоения данных. Процедура усвоения данных основана на алгоритме LETKF и работает циклично. Цикл начинается с расчета по модели на 7 дней, далее находится оценка приземной концентрации метана для средних значений по ансамблю за недельный период (7 дней).

Эта оценка усредняется для подобластей. Важно отметить, что алгоритм усвоения обладает свойством локальности, что позволяет ускорить вычисления и проводить их параллельно для каждой точки сетки. Усреднение для подобластей помогает сгладить случайные ошибки в наблюдениях, а также выявить динамику активности подобластей за длительный период, облегчая анализ больших объемов данных. Перед следующим циклом моделирования значения приземной концентрации метана обновляются, используя полученную оценку. Процесс моделирования продолжался циклично, с обновлением данных раз в неделю на протяжении всего 2016 г. Это позволило учесть долгосрочные тенденции в выделении метана и его влияние на распределении роста концентрации по всему Земному шару. Для оценки достоверности полученных результатов вычислялась норма отклонения оценки от принятого за реальное («истинное») состояния системы значения.

Также стоит подчеркнуть следующее.

- Выбор временного интервала в одну неделю для оценки приземной концентрации метана обусловлен необходимостью получения усредненных данных на достаточно короткий промежуток времени. Этот подход позволяет более точно оценивать динамику концентрации метана на поверхности Земли.
- Для обеспечения точности и надежности оценок приземной концентрации метана поверхность Земли была разбита на подобласти. Это позволило учесть различия в динамике и характеристиках регионов, а также сгладить возможные случайные ошибки и сбои в данных.
- Учитывая, что система усвоения данных настроена на оценку концентрации метана на нижней границе атмосферы, начальные значения концентрации метана для каждой подобласти были включены в анализ. Это обеспечило учет климатических особенностей и предварительную оценку концентрации метана в рассматриваемых регионах.
- Шаг анализа включал проведение экспериментов как для наблюдений, заданных в сетке модели, так и в сетке спутниковых наблюдений. Модельные данные наблюдений были интерполированы в узлы сетки, соответствующие спутниковым наблюдениям, для оценки влияния интерполяции на точность результатов. Это позволило оценить эффективность использования различных методов анализа и их влияние на конечные результаты.
- Применение локального алгоритма оценки позволило получать независимые оценки концентрации метана для каждого узла сетки модели.

Результаты численных экспериментов с модельными данными

С разработанным алгоритмом усвоения данных были проведены численные эксперименты с модельными данными. В первой серии экспериментов считалось, что модельные данные есть во всех узлах сетки модели на первом уровне по высоте каждые 6 часов.

На рис. 1 представлены результаты численных экспериментов с модельными данными. Горизонтальная ось отображает циклы усвоения данных, где каждый цикл соответствует одной неделе в течение года, что составляет 48 циклов усвоения за 2016 год. По вертикальной оси отмечается размер среднеквадратической ошибки получаемой оценки. Под среднеквадратической ошибкой понимается норма отклонения приземной концентрации после процедуры усвоения от «истинного» значения. Оранжевый график изображает введенную погрешность. Синий график соответствует результатам эксперимента, в котором происходит усвоение данных только на нижнем уровне модели, что соответствует симуляции усвоению данных наблюдений, доступных из сети наземных измерений. Оранжевый график представляет результаты эксперимента, в котором усваиваются данные наблюдений, заданных для вертикального профиля, аналогично данным, получаемым со спутника. Следует отметить, что второй вариант эксперимента имитирует усвоение данных наблюдений в каждой точке сетки и в каждый мо-

мент моделирования, однако в реальности такие наблюдения поступают в ограниченном объеме и количестве.

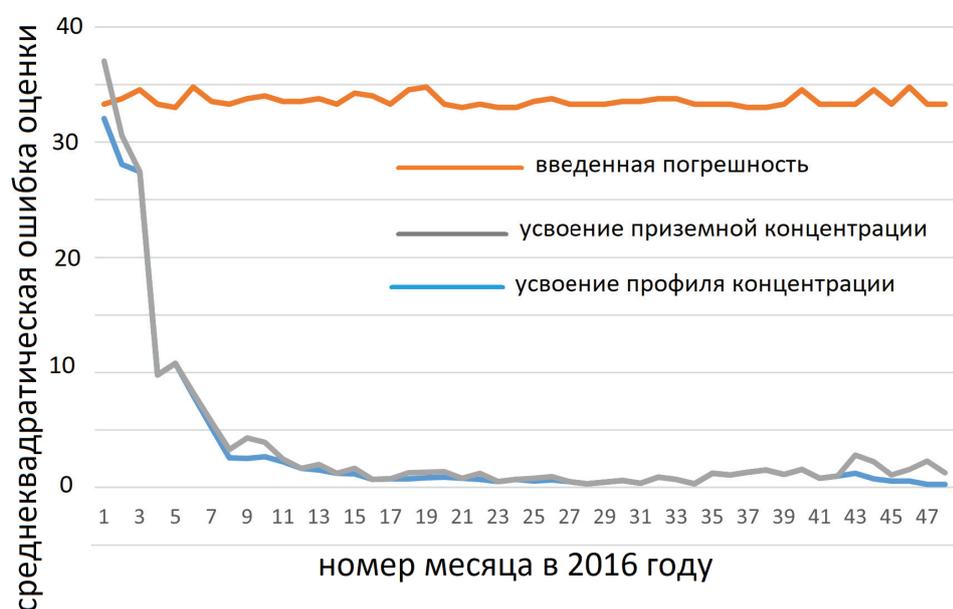


Рис. 1. Среднеквадратическая ошибка оценки приземной концентрации метана
Fig. 1. Root Mean Square Error in Estimating Surface Methane Concentrations

При введенной погрешности в размере 30–40 ppb получаемая среднеквадратическая ошибка оценки приземной концентрации метана меньше вносимой погрешности, что является достаточно хорошим показателем проведенного эксперимента. Отметим также, что в экспериментах с реальными данными достичь таких результатов невозможно, так как присутствует этап интерполяции данных, данные наблюдений доступны не в каждый момент времени и не в каждой точке сетки модели и т. д.

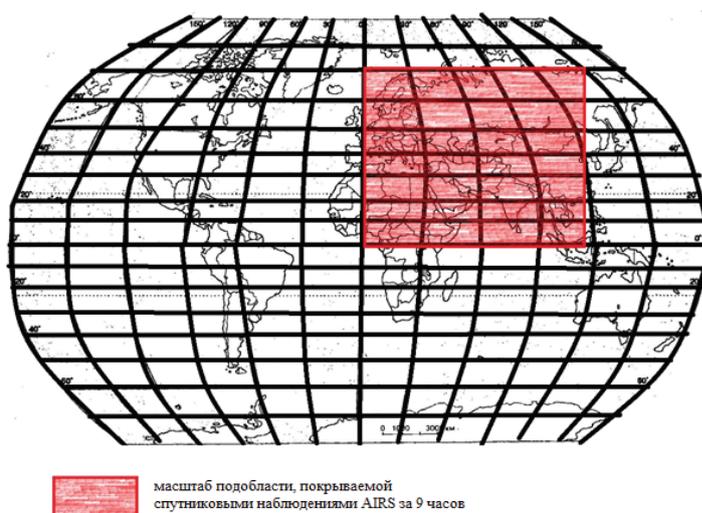


Рис. 2. Масштаб подобласти, покрываемой спутниковыми наблюдениями AIRS за окно усвоения (9 ч)

Fig. 2. Scale of subregion covered by AIRS satellite observations during the assimilation window (9 h)

Во второй серии экспериментов рассматривалось распределение данных в пространстве и времени, характерное для спутниковых данных AIRS [18; 19]. На рис. 2 представлен размер области, охватываемой спутниковыми измерениями, доступными для усвоения данных каждые 6 ч. В рамках алгоритма усвоения используется временной интервал (окно усвоения), в пределах которого используются данные наблюдений. В проведенных экспериментах окно усвоения составляет 9 ч, что означает, что данные наблюдений, полученные за 4,5 ч до и 4,5 ч после момента моделирования, учитывались при оценке. Рисунок иллюстрирует только масштаб (а не расположение) области, в которой можно получить оценки нижних границ концентрации метана с использованием спутниковых данных, каждые 6 ч. Каждые 6 ч подобласть, имеющая данные для усвоения, меняет свое положение, но размер остается примерно одинаковыми для каждого момента усвоения.

На рис. 3 представлены результаты численных экспериментов с использованием модельных данных, адаптированных под ошибки и ограничения, характерные для спутниковых данных AIRS. В случае сбоя измерительного инструмента или отсутствия данных AIRS на шаге анализа в определенной точке процесс поиска оценки приземной концентрации метана в этой точке не проводится. Вместо этого значение оценки, полученное на предыдущем временном шаге, остается неизменным и используется как текущая оценка для следующего шага по времени.

На рисунке приводится относительная ошибка (в процентах) оценок, найденных с 3-й по 48-ю неделю 2016 г. для каждой подобласти.

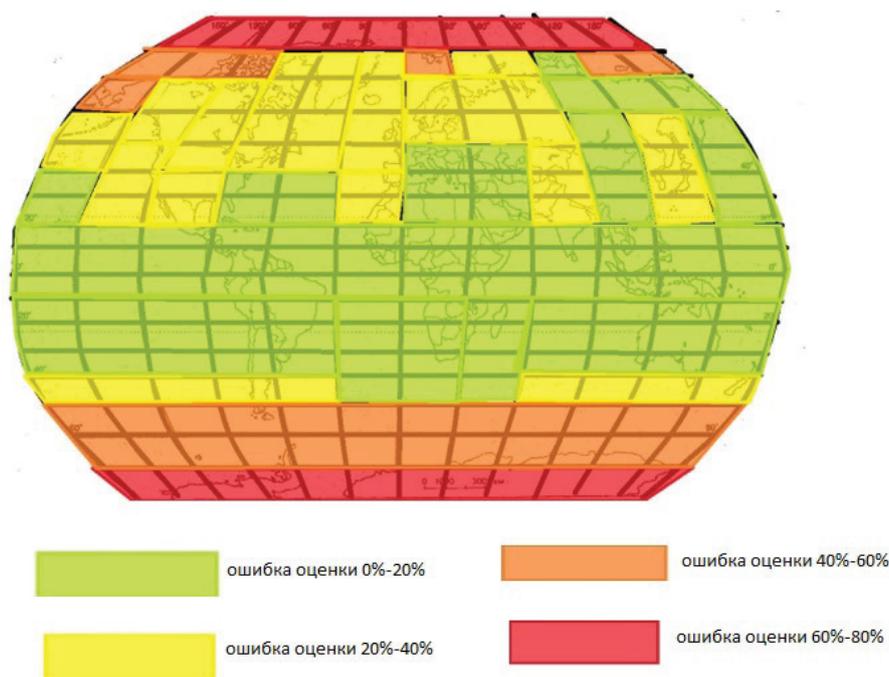


Рис. 3. Результаты модельных экспериментов с использованием модельных данных, адаптированных под характеристики спутниковых данных AIRS: средний процент ошибки оценки, получаемой с 3-й по 48-ю неделю 2016 г. по подобластям

Fig. 3. Results of model experiments using model data adapted to the characteristics of AIRS satellite data: average percentage of estimation error obtained from weeks 3 to 48 of 2016 by subarea

Как видно из рисунка, точность восстановления приземной концентрации зависит от региона. Это связано с тем, что спутник с измерительными приборами ориентирован по движению вдоль экватора, чем дальше от него область измерения, тем менее плотными становятся дан-

ные, получаемые со спутника. Также имеет место нерегулярность их поступления – данные для каждой подобласти поступают с интервалом примерно в 12 ч. Кроме того, на получаемые значения оказывают влияние наличие облаков и атмосферных аэрозолей, что может приводить к искажению данных.

На рис. 4 представлено поведение среднеквадратической ошибки получаемой оценки в результатах модельных экспериментов с учетом различных факторов, влияющих на условия эксперимента, проводимого с реальными данными наблюдений AIRS. Это включает эпизодичность поступления данных наблюдений AIRS, использование окна усвоения, наличие ошибок и другие аспекты. Также для сравнения на графике изображена введенная погрешность значений приземной концентрации. На рисунке приведены средние по всем подобластям на поверхности Земли значения, а также отдельно для подобласти «Сибирь» (50 градусов – 60 градусов с. ш., 80 градусов – 90 градусов в. д.).

Следует отметить, что на графике среднеквадратической ошибки оценки можно наблюдать ступенчатый характер улучшения получаемых оценок. Это указывает на постепенное снижение ошибки в процессе анализа данных и свидетельствует о том, что процедура усвоения данных, использующая модельные данные с учетом всех факторов, позволяет достичь достаточно высокой точности оценки приземной концентрации метана в атмосфере.

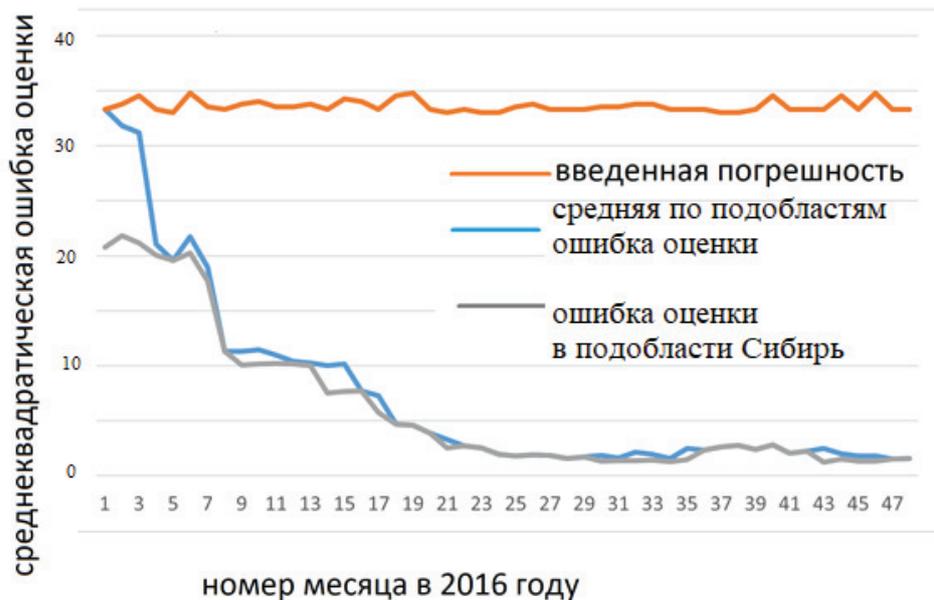


Рис. 4. График среднеквадратической ошибки оценки, получаемой при использовании имитации спутниковых данных AIRS

Fig. 4. Graph of the root mean square error of the estimate obtained using simulated AIRS satellite data

Таким образом, результаты численных экспериментов с модельными данными позволяют сделать вывод о возможности получения оценки приземной концентрации в процедуре усвоения данных с хорошей точностью. Отметим, что при проведении численных экспериментов с реальными данными полученная оценка приземной концентрации будет являться базой для оценки динамики потоков метана с поверхности Земли.

Заключение

В работе представлены результаты численных экспериментов с модельными данными по оценке приземной концентрации метана с использованием алгоритма ансамблевого фильтра Калмана. В алгоритме использовалась глобальная транспортная химическая модель MOZART-4. При моделировании данных наблюдений рассматривались различные сценарии их пространственно-временного распределения.

Из результатов проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что полученные оценки приземной концентрации метана достаточно точны и находятся в пределах заданной погрешности. Эти результаты говорят о возможности использования данного подхода для дальнейшей оценки эмиссии метана. Важно отметить, что анализ и оценка приземной концентрации метана являются ключевыми этапами для понимания процессов эмиссии парникового газа и разработки соответствующих стратегий уменьшения его выбросов.

Список литературы

1. **Nakamura G., Potthast R.** Inverse Modeling. IOP Publishing Ltd, 2015. P. 484.
2. **Penenko A., Penenko V., Tsvetova E., Gochakov A., Pyanova E., Konopleva V.** Sensitivity Operator Framework for Analyzing Heterogeneous Air Quality Monitoring Systems // Atmosphere. 2021. Vol. 12. P. 1–30.
3. **Vocquet M.** Data assimilation in atmospheric chemistry models: current status and future prospects for coupled chemistry meteorology models // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2014. Vol. 14. P. 322.
4. **Климова Е. Г.** Экономичный алгоритм стохастического ансамблевого сглаживания // Сибирский журнал вычислительной математики. 2020. Т. 23, № 4. С. 381–394.
5. **Климова Е. Г.** Стохастический ансамблевый фильтр Калмана с трансформацией ансамбля возмущений // Сибирский журнал вычислительной математики РАН. 2019. Т. 22, № 1. С. 27–40.
6. **Klimova E. G.** Methods of estimation of greenhouse gases concentration in the atmosphere using observations and transport and diffusion model, based on the ensemble Kalman filter // All-Russian Conference “Spatial Data Processing for Monitoring of Natural and Anthropogenic Processes, SDM”. 2017. Vol. 2033. P. 191–195.
7. **Klimova E. G.** Bayesian approach to data assimilation based on ensembles of forecasts and observations // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2019. DOI 10.1088/1755-1315/386/1/012038
8. **Feng L., Palmer P.I., Bosch H., Dance S.** Estimating surface CO₂ fluxes from space-borne CO₂ dry air mole fraction observations using an ensemble Kalman filter // Atmospheric chemistry and physics. 2009. Vol. 9. P. 2619–2633.
9. **Feng L.** Evaluating a 3-D transport model of atmospheric CO₂ using ground-based, aircraft, and space-borne data // Atmospheric chemistry and physics. 2011. Vol. 11. P. 2789–2803.
10. **Feng L., Palmer P. I., Parker R. J., Deutscher N. M., Feist D. G., Kivi R., Morino I., Sussmann R.** Estimates of European uptake of CO₂ inferred from GOSAT X CO₂ retrievals: sensitivity to measurement bias inside and outside Europe // Atmospheric chemistry and physics. 2016. Vol. 16. P. 1289–1302
11. **Platonova M. V., Klimova E. G.** Determining the likely localization of methane sources using forecast time series and satellite data // CEUR Workshop Proceedings. 2021. Vol. 3006. P. 323–329.

12. **Platonova M. V., Klimova E. G.** An algorithm for estimating greenhouse gas fluxes using satellite data for a global transport and diffusion model // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1715(1). P. 012021.
13. **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
14. **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
15. **Lu Xiao.** Methane emissions in the United States, Canada, and Mexico: evaluation of national methane emission inventories and 2010–2017 sectoral trends by inverse analysis of in situ (GLOBALVIEWplus CH₄ ObsPack) and satellite (GASAT) atmospheric observations // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2022. Vol. 22. P. 395–418.
16. **Bisht Jagat S. H.** Estimation of CH₄ emission based on an advanced 4D-LETKF assimilation system // *Geoscientific Model Development*. 2023. Vol. 16. P. 1823–1838.
17. **Evensen G.** Data assimilation. The ensemble Kalman filter. Berlin, Springer-Verlag, Heidelberg, 2009. P. 307.
18. **Elansky N. F., Shilkin A. V., Ponomarev N. A., Zakharova P. V., Kachko M. D., Poliakov T. I.** Spatiotemporal Variations in the Content of Pollutants in the Moscow Air Basin and Their Emissions // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2022. Vol. 58, no. 1. P. 80–94.
19. **Kulawik S. S.** Evaluation of single-footprint AIRS CH₄ profile retrieval uncertainties using aircraft profile measurements // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2021. Vol. 14. P. 335–354.

References

1. **Nakamura G., Potthast R.** Inverse Modeling, IOP Publishing Ltd, 2015, p. 484.
2. **Penenko A., Penenko V., Tsvetova E., Gochakov A., Pyanova E., Konopleva V.** Sensitivity Operator Framework for Analyzing Heterogeneous Air Quality Monitoring Systems. *Atmosphere*, 2021, vol. 12, pp. 1–30.
3. **Bocquet M.** Data assimilation in atmospheric chemistry models: current status and future prospects for coupled chemistry meteorology models. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 2014, vol. 14, p. 322.
4. **Klimova E. G.** Economical algorithm for stochastic ensemble smoothing. *Siberian Journal of Computational Mathematics*, 2020, vol. 23, no. 4, pp. 381–394. (in Russ.)
5. **Klimova E. G.** Stochastic ensemble Kalman filter with transformation of the ensemble of disturbances. *Siberian Journal of Computational Mathematics RAS*, 2019, vol. 22, no. 1, pp. 27–40. (in Russ.)
6. **Klimova E. G.** Methods of estimation of greenhouse gases concentration in the atmosphere using observations and transport and diffusion model, based on the ensemble Kalman filter. *All-Russian Conference "Spatial Data Processing for Monitoring of Natural and Anthropogenic Processes, SDM"*, 2017, vol. 2033, p. 191–195.
7. **Klimova E. G.** Bayesian approach to data assimilation based on ensembles of forecasts and observations. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019. DOI 10.1088/1755-1315/386/1/012038
8. **Feng L., Palmer P.I., Bosch H., Dance S.** Estimating surface CO₂ fluxes from space-borne CO₂ dry air mole fraction observations using an ensemble Kalman filter. *Atmospheric chemistry and physics*, 2009, vol. 9, pp. 2619–2633.
9. **Feng L.** Evaluating a 3-D transport model of atmospheric CO₂ using ground-based, aircraft, and space-borne data. *Atmospheric chemistry and physics*, 2011, vol. 11, pp. 2789–2803.

10. **Feng L., Palmer P. I., Parker R. J., Deutscher N. M., Feist D. G., Kivi R., Morino I., Sussmann R.** Estimates of European uptake of CO₂ inferred from GOSAT X CO₂ retrievals: sensitivity to measurement bias inside and outside Europe. *Atmospheric chemistry and physics*, 2016, vol. 16, pp. 1289–1302
11. **Platonova M. V., Klimova E. G.** Determining the likely localization of methane sources using forecast time series and satellite data. *CEUR Workshop Proceedings*, 2021, vol. 3006, pp. 323–329.
12. **Platonova M. V., Klimova E. G.** An algorithm for estimating greenhouse gas fluxes using satellite data for a global transport and diffusion model. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1715(1), p. 012021.
13. **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
14. **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
15. **Lu Xiao.** Methane emissions in the United States, Canada, and Mexico: evaluation of national methane emission inventories and 2010–2017 sectoral trends by inverse analysis of in situ (GLOBALVIEWplus CH₄ ObsPack) and satellite (GASAT) atmospheric observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, vol. 22, pp. 395–418.
16. **Bisht Jagat S. H.** Estimation of CH₄ emission based on an advanced 4D-LETKF assimilation system. *Geoscientific Model Development*, 2023, vol. 16, pp. 1823–1838.
17. **Evensen G.** Data assimilation. The ensemble Kalman filter. Berlin, Springer-Verlag. Heideberg, 2009. P. 307.
18. **Elansky N. F., Shilkin A. V., Ponomarev N. A., Zakharova P. V., Kachko M. D., Poliakov T. I.** Spatiotemporal Variations in the Content of Pollutants in the Moscow Air Basin and Their Emissions. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, 2022, vol. 58, no 1, pp. 80–94.
19. **Kulawik S. S.** Evaluation of single-footprint AIRS CH₄ profile retrieval uncertainties using aircraft profile measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, vol. 14, pp. 335–354.

Сведения об авторах

Платонова Марина Владимировна, младший научный сотрудник
Researcher ID WoS: AFI-8086-2022

Котлер Василий Дмитриевич, младший научный сотрудник

Климова Екатерина Георгиевна, доктор физико-математических наук
Researcher ID WoS: S-5641-2016

Information about the Authors

Marina V. Platonova, Junior Researcher
Researcher ID WoS: AFI-8086-2022

Vasily D. Kotler, Junior Researcher

Ekaterina G. Klimova, Doctor of Physical and Mathematical Sciences
Researcher ID WoS: S-5641-2016

*Статья поступила в редакцию 08.03.2024;
одобрена после рецензирования 05.04.2024; принята к публикации 05.04.2024*

*The article was submitted 08.03.2024;
approved after reviewing 05.04.2024; accepted for publication 05.04.2024*