

## Численные эксперименты с реальными данными по оценке потоков парниковых газов в регионе

*М. В. Платонова<sup>1, 2\*</sup>, Е. Г. Климова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,  
г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,  
г. Новосибирск, Российская Федерация

\* e-mail: gumoznaya@gmail.com

**Аннотация.** Данная работа посвящена актуальной задаче получения оценки эмиссии метана используя спутниковые данные и результаты математического моделирования. Для реализации алгоритма используется вариант локального ансамблевого фильтра Калмана (LETKF), представляющий собой оптимальную оценку искомого параметра на основе данных наблюдений и прогноза по математической модели в заданном временном интервале. Данный алгоритм обладает свойствами, которые позволяют использовать его локально, т.е. проводить усвоение данных по подобластям. В работе представлена реализация алгоритма для реальных данных наблюдений и результатов математического моделирования (расчет прогноза состояния системы). В качестве результатов математического моделирования взяты результаты трехмерной модели переноса и диффузии (MOZART-4), а в качестве данных наблюдений использованы данные спутниковых наблюдений (данные AIRS). В результате работы алгоритма была получена средняя оценка потоков метана в подобласти на заданных временных интервалах.

**Ключевые слова:** усвоение данных, спутниковые данные, ансамблевый фильтр Калмана

## Numerical experiments with real data for estimating greenhouse gas fluxes in a region

*M. V. Platonova<sup>1, 2\*</sup>, E. G. Klimova<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Federal Research Center for Information and Computing Technologies, Novosibirsk,  
Russian Federation

<sup>2</sup> Novosibirsk National Research State University, Novosibirsk, Russian Federation

\* e-mail: gumoznaya@gmail.com

**Abstract.** This work is devoted to the problem of obtaining an estimate of methane emissions using satellite data and the results of mathematical modeling. To implement the algorithm, a variant of the local Kalman ensemble filter (LETKF) is used, which represents an optimal estimate of the desired parameter based on observational data and a forecast based on a metematic model in a given time interval. This algorithm has properties that allow it to be used locally, i.e., to assimilate data by subdomains. The paper presents the implementation of the algorithm for real observational data and the results of mathematical modeling (calculation of the forecast of the state of the system). The results of the three-dimensional model of transport and diffusion (MOZART-4) are taken as the results of mathematical modeling, and satellite observations (AIRS data) are used as observational data. As a result of the algorithm, an average estimate of methane fluxes in the subdomain was obtained at specified time intervals.

**Keywords:** data assimilation, satellite data, Ensemble Kalman filter

## **Введение**

Поиск источников и эмиссии метана является актуальной задачей, интерес к решению которой растет в последнее время. Международный интерес связан с различными политическими и экономическими факторами, включая введение «Углеродного налога», исследование парниковых газов (их состав, количество и происхождение), изучение состоянием окружающей среды и т.п. Обычной практикой является использование систем усвоения данных для решения подобных задач [1-3]. В данной работе задача оценки потоков метана решается с использованием методов усвоения данных – комбинирование результатов математического моделирования и данных наблюдений для получения оптимальной оценки. В случае современных математических моделей с высоким пространственным разрешением алгоритм является очень трудоемким из-за высокой размерности векторов прогнозируемых переменных и данных наблюдений [4-6].

В данной статье используется подход к решению задачи, основанный на декомпозиции области, при этом усвоение данных проводится в подобластях. В качестве оцениваемого параметра рассматриваются потоки метана с поверхности Земли. В статье приведены результаты численных экспериментов с реальными данными по реализации шага анализа алгоритма усвоения данных для глобальной модели переноса-диффузии и данных спутниковых наблюдений.

### **Методы и материалы**

Аналогично подобным работам, будем искать оценку потоков метана по данным спутниковых наблюдений на заданном временном интервале. Потоки метана будут оцениваться по наблюдаемым концентрациям метана, этот вариант алгоритма рассматривается во многих современных работах [7-8].

Оценка средних значений потоков в подобластях по данным наблюдений осуществляется по стандартной формуле ансамблевого фильтра Калмана. Ниже представлены формулы шага анализа фильтра Калмана [9]:

$$x_a = x_f + K[y_0 - H(x_f)], \quad (1)$$

$$K = P^f H^T (HP^f H^T + R)^{-1}, \quad (2)$$

где  $x_a$  – оценка среднего потока в подобласти,  $x_f$  – прогноз по модели,  $y_0$  – данные наблюдений. Чтобы реализовать ансамблевый фильтр Калмана, необходимо задать ансамбль возмущений оцениваемой величины [9]:

$$Dx_f = \frac{1}{\sqrt{N}} [dx_f^1, \dots, dx_f^N]^T,$$

где  $N$  - размер ансамбля. В таком случае матрица  $P^f$  и матрица  $K$  вычисляются с помощью ансамбля возмущений:

$$P^f = Dx_f(Dx_f)^T,$$

$$K = Dx_f(HDx_f)^T[HDx_f(HDx_f)^T + R]^{-1}.$$

Мы будем считать, что уравнение изменений потоков по времени (шаг прогноза — изменение переменной соответствии с моделью) имеет вид  $x_f^{n+1} = x_f^n$ ,  $n$  — номер шага по времени.

Данные наблюдений о концентрации парниковых газов в момент времени  $t_n$  могут быть представлены в виде:

$$y_0^n = H[f(q_t^n) + x_t^n] + \varepsilon_0,$$

где оператор  $H$  включает в себя прогноз по модели в момент наличия данных наблюдений, интерполяцию от узлов сетки к точкам наблюдения;  $f$  - оператор модели, описывающей изменение концентрации  $q_t^n$  во времени.

Оператор наблюдения можно записать в следующем виде:

$$H(dx_f^i) = H_1[f(q_t^n) + x_t^n + dx_f^i - f(q_t^n) + x_t^n],$$

где  $H_1$  - оператор интерполяции в точку наблюдения.

Алгоритм усвоения данных состоит из чередующихся этапов прогноза и анализа, причем этап анализа производится в момент наличия данных наблюдений. Мы рассмотрим вариант ансамблевого фильтра Калмана, в котором ковариационная матрица ошибок прогноза задается в начальный момент и считается постоянной во времени.

Ковариационная матрица ошибок прогноза может быть представлена в виде  $Dx_f(Dx_f)^T$ , при задаваемом ансамблевом возмущении  $Dx_f$ .

Формулы шага анализа усвоения данных имеет вид (1) - (2). Рассмотрим реализацию алгоритма шага анализа, основанного на детерминированном алгоритме LETKF [10-11]:

$$x_a = x_f + Dx_f P^a (HDx_f)^T R^{-1}, \quad (3)$$

$$P^a = [(N-1)I + (HDx_f)^T R^{-1} HDx_f]^{-1}, \quad (4)$$

В этом случае алгоритм анализа становится локальным, таким образом он может быть реализован для любого узла сетки независимо [10-11], кроме того операции выполняются с матрицами размерности ансамбля. Этот алгоритм может быть реализован в упрощенной детерминированной версии, в которой ансамбль возмущений не пересчитывается в соответствии с моделью. Схожая версия алгоритма рассматривается во многих современных работах [1-5].

Благодаря специфике используемого алгоритма, можно выполнить этап анализа локально. Поверхность Земного шара была разделена на подобласти равного размера (примерно 1000 км на 1000 км). Далее работа алгоритма осуществлялась для каждой подобласти.

В численных экспериментах были использованы результаты расчетов по математической модели MOZART-4. Это глобальная модель, исходный код которой находится в свободном доступе. Результаты расчетов этой модели были предоставлены коллегами Анатолием Александровичем Лагутиным и Егором Юрьевичем Мордвиним [12]. Эта модель автономна, для работы требуются только метеорологические данные на время моделирования. Модель включает в себя 85 типов газов и 12 аэрозольных компонентов. Содержание каждого компонента модели в атмосфере определяется решением уравнения сохранения массы с учетом адвективного, конвективного и диффузионного переноса. Кроме того, учитывается эмиссионная составляющая подстилающей поверхности, аэрозоли, фотохимические реакции. В модели MOZART-4, которая была использована для расчетов, был использован стандартный набор химических реакций.

В качестве данных наблюдений для этапа анализа были использованы данные со спутника AIRS. Атмосферный инфракрасный зонд AIRS, запущенный на низкую околоземную орбиту 4 мая 2002 года на борту спутника NASA Aqua, предоставляет данные для мониторинга атмосферы Земли. AIRS является одним из инструментов на борту спутника Aqua, AIRS измеряет все первичные парниковые газы, включая углекислый газ, окись углерода, метан, озон и другие.

Инструмент AIRS на спутнике NASA Aqua вращается вокруг Земли от полюса до полюса примерно пятнадцать раз в день. Используемые информационные продукты данных AIRS разделены на серийные 6-минутные гранулы, и каждая гранула представляет собой файл, на каждый день приходится 240 гранул. Для правильного сравнения спутниковых наблюдений с модельными симуляциями модельные данные должны быть интерполированы в точку наличия наблюдений, для вычисления невязки. Модель переноса и диффузии рассчитывает прогноз на основе заданных начальных значений концентраций и потоков за период времени с заданным временным шагом, затем выполняется интерполяция на точку наблюдения и время, в которое производится наблюдение. Далее поиск оценки для подобласти осуществляется по формулам (3) - (4).

### *Результаты*

Численные эксперименты проводились с реальными данными для описанного выше алгоритма усвоения данных. Вся территория была разделена на подобласти, анализ проводится локально для каждой подобласти отдельно. Возможность выполнения шага анализа локально обусловлена свойствами используемого алгоритма. Результаты прогноза по модели MOZART-4 и данные наблюдений были взяты за один период, полученные данные были проинтерполированы в точки наличия спутниковых наблюдений. При создании ансамбля возмущений были использованные случайные величины, имеющие нормальное распределение, нулевое среднее и заданную дисперсию.

Для сравнительного анализа полученных оценок потоков метана были взяты две подобласти Сибирского региона (размером 1000 км на 1000 км). Два региона Сибири были выбраны следующим образом:

1) от 50°36' до 58°48' северной широты и от 78°24' до 86°48' восточной долготы (Новосибирская область)

2) от 55°40' до 59°00' северной широты и от 75°30' до 83°03' восточной долготы (Васюганские болота).

Подобный выбор подобластей позволяет сравнить полученные оценки потоков для подобластей, имеющих разный тип покрытия – городская среда и природные болота, а как известно Васюганские болота являются крупным природным источником метана.

Вычисление невязки проводится на этапе анализа, вычисления проводились за летний и зимний периоды для сравнения тенденции изменения естественной эмиссии метана. Под невязкой понимается значение вектора

$$r = y_0 - H(x_f),$$

которое характеризует вклад данных наблюдений в оценку потоков.

Были использованы данные наблюдений за 6-часовой интервал в 2-х разных погодных сезона – лето и зима: 1) с 00:00 UTC 29 августа 2008 года до 6:00 утра 29 августа 2008 года; 2) с 00:00 UTC 30 ноября 2008 года до 6:00 утра 30 ноября 2008 года. Результаты экспериментов с реальными данными и найденная невязка в подобластях приведены в табл. 1.

*Таблица 1*

Результаты численных экспериментов

Период вычислений	Лето (29 августа 2008 г.)	
Подобласть вычислений (центр подобласти)	г. Новосибирск	Васюганские болота
Средняя невязка для подобласти (ppm)	6.169931157273822e-07	6.171729455672903e-07
Период вычислений	Зима (29 ноября 2008 г.)	
Средняя невязка для подобласти (ppm)	5.773783414042554e-07	6.417965823857231e-07

Приведена средняя по высоте (по уровням) невязка для метана в двух подобластях на территории Сибири: средняя по подобласти невязка для Новосибирской области, и средняя невязка для подобласти, содержащей Васюганские болота. Вычисления были проведены для двух разных сезонов – лето и зима.

**Обсуждение**

Были проведены предварительные эксперименты, показывающие результат вычисления невязки для двух разных по характеристикам подобластям – терри-

тория крупного города и крупные природные Васюганские болота. Сравнение полученных результатов с фоновым прогнозом показывают соразмерность иско- мых величин с получаемым результатом.

### ***Заключение***

В данной работе был представлен алгоритм усвоения данных и представ- ленны результаты реализации шага анализа (вычисление невязки) для реальных данных наблюдений и результатов математического моделирования. В качестве результатов математического моделирования взяты результаты модели MOZART-4, в качестве данных наблюдений - данные AIRS. Была получена не- вязка для потоков метана в двух подоблостях региона Сибири. В дальнейшем пла- нируется масштабировать эксперименты и в качестве продолжения исследова- ний вычислять среднюю по подоблостям оценку потоков метана.

### ***Благодарности***

Авторы статьи выражают глубокую благодарность коллегам, предоставив- шим материалы для работы: профессор А. А. Лагутин и доцент Е. Ю. Мордвин.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Feng L., Palmer P.I., Bosch H. and Dance S. Estimating surface CO<sub>2</sub> fluxes from space- borne CO<sub>2</sub> dry air mole fraction observations using an ensemble Kalman filter // Atmospheric chemistry and physics 2009. Vol. 9 P. 2619-2633.
2. Feng L., Palmer P.I., Yang Y., Yantosca R.M., Kawa S.R., Paris J.-D., Matsueda H. and Machida T. Evaluating a 3-D transport model of atmospheric CO<sub>2</sub> using ground-based, aircraft, and space-borne data // Atmospheric chemistry and physics 2011. Vol. 11 P. 2789-2803.
3. Feng L., Palmer P.I., Parker R.J., Deutscher N.M., Feist D.G., Kivi R., Morino I. and Sussmann R. Estimates of European uptake of CO<sub>2</sub> inferred from GOSAT XCO<sub>2</sub> retrievals: sensitivity to measurement bias inside and outside // Europe Atmospheric chemistry and physics 2016. Vol. 16 P. 1289-1302.
4. Feng L. et al. Consistent regional fluxes of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> inferred from GOSAT proxy XCH<sub>4</sub>: XCO<sub>2</sub> retrievals 2010-2014 // Atmospheric chemistry and physics 2017. Vol. 17 P. 4781-4797.
5. Fraser A., Palmer P.I., Feng L., Bösch H., Parker R., Dlugokencky E.J., Krummel P.B. and Langenfelds R.L. Estimating regional fluxes of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> using space-borne observations of XCH<sub>4</sub>: XCO<sub>2</sub> // Atmospheric chemistry and physics 2014. Vol. 14 P. 12883-12895.
6. Kang J., Kalnay E., Miyoshi T., Liu J. and Fung I. Estimating of surface carbon fluxes with an advanced data assimilation methodology // Journal of geophysical research 2012. Vol. 116 D24101.
7. Klimova E. G. An efficient algorithm for stochastic ensemble smoothing // Siberian J. Num. Math. 2020. 23. N 4. P. 381–393.
8. Klimova E.G. Application of ensemble Kalman filter in environment data assimilation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 211. P. 012049.
9. Evensen G. Data assimilation. The ensemble Kalman filter Berlin, Heideberg: Spriger-Verlag, 2009.
10. Houtekamer P.L. and Zhang H.F. Review of the ensemble Kalman filter for atmospheric data assimilation // Monthly Weather Review 2016. Vol. 144 P. 4489-4532.
11. Hunt B.R., Kostelich E.J. and Szunyogh I. Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter // Physica D 2007. Vol. 230 P. 112-126.
12. Mordvin E.Y., Lagutin A.A. Methane in the atmosphere of Western Siberia Barnaul, Azbuka, 2016

© М. В. Платонова, Е. Г. Климова, 2022