

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

## **Оценка потоков метана с поверхности Земли с использованием спутниковых наблюдений на основе методов усвоения данных**

<sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,  
г. Новосибирск, Российская Федерация  
\* e-mail: gumoznaya@gmail.com

**Аннотация.** В докладе приводится методика оценки изменения потоков метана в пространстве и времени по спутниковым данным и прогнозам по модели переноса и диффузии. Алгоритм основан на вычислении оптимальной оценки по данным наблюдений и прогнозу в заданном временном интервале. Вычисляются средние значения в заданных подобластях для временного периода 7 дней. Предлагается методика оценки зон с максимальной эмиссией, проводится изучение поведения этих оценок по времени для различных сезонов. Предложенная методика позволяет эффективно оценить наиболее вероятные области для детального изучения возможных источников метана.

**Ключевые слова:** усвоение данных, спутниковые наблюдения, потоки парниковых газов

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

## **Estimation of methane fluxes from the Earth's surface from using satellite observations based on data assimilation methods**

<sup>1</sup> Federal Research Center for Information and Computing Technologies,  
Novosibirsk, Russian Federation  
\* e-mail: gumoznaya@gmail.com

**Abstract.** The report presents a methodology for estimating changes in methane fluxes in space and time based on satellite data and forecasts based on a transport and diffusion model. The algorithm is based on the calculation of the optimal estimate based on observational data and forecast in a given time interval. Average values are calculated in the given subdomains for a time period of 7 days. A technique for estimating zones with maximum emission is proposed, and the behavior of these estimates over time for different seasons is studied. The proposed technique makes it possible to effectively assess the most probable areas for a detailed study of possible methane sources.

**Keywords:** data assimilation, satellite observations, greenhouse gas fluxes

### ***Введение***

На сегодняшний день изменение климата стало одним из самых важных и обсуждаемых вопросов в научных и практических кругах. Ученые и эксперты во всем мире уделяют этой проблеме большое внимание, поскольку она имеет глобальное значение и оказывает значительное влияние на экономику, социальную сферу и окружающую среду. В целом, исследование потоков парниковых газов является важной составляющей для понимания и борьбы с глобальным изменением климата, поэтому задача становится более актуальной каждый год. Мониторинг и оценка потоков парниковых газов, таких как углекислый газ и метан,

критически важны для понимания процесса глобального потепления и принятия соответствующих мер для предотвращения его последствий.

### **Методы и материалы**

В работе применяется подход, основанный на методах и алгоритмах усвоения данных [1, 2, 3]. Под усвоением данных принято понимать совместное использование данных наблюдений и математической модели, для получения оптимальной в некотором смысле оценки. В данной работе рассматривается динамико-стохастический подход к задаче усвоения данных.

Для решения задачи усвоения данных требуются значительные вычислительные ресурсы. В настоящее время используются ансамблевые алгоритмы, которые позволяют снизить трудоемкость задачи [4, 5, 6]. Алгоритм LETKF является вариантом детерминированного ансамблевого фильтра Калмана. Он осуществляет анализ только для среднего значения ансамбля и затем вычисляет ансамбль анализов. Формулы шага анализа алгоритма LETKF для шага №  $n$  по времени представлены ниже:

$$x_a = \bar{x}_f + Dx_f \tilde{P}^a (HDx_f)^T R^{-1} (y^i - Hx_f^i),$$

где  $P^a = [(N - 1)I + (HDx_f)^T R^{-1} HDx_f]^{-1}$ .

Определение средних значений потоков в подобластях на основе наблюдений выполняется по формулам:

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

где  $K = P^f H^T (HP^f H^T + R)^{-1}$ .

Ниже приведена схема численных экспериментов с модельными и реальными данными для поиска оценки потоков парниковых газов с поверхности Земли.

Реализация алгоритма состоит из следующих этапов:

- Определение временного интервала.

В алгоритмах обработки больших объемов спутниковых данных для оценки потоков парниковых газов принято проводить оценку для заданного временного интервала, например, для недели. При этом предполагается, что значения потоков постоянны в течение этого временного периода.

- Разбиение поверхности Земного шара на подобласти.

Поверхность Земного шара разбивается на регионы, для которых производится оценка. Оценка проводится отдельно для каждой подобласти.

- Задаются начальные (климатические) значения потоков в регионах (при наличии такой информации).

- Данные наблюдений разбиваются по подобластям и по временным интервалам.

- Проводится интерполяция данных расчетов математической модели на уровни наблюдений (по высоте).

- Находится оценка потоков парниковых газов для заданной территории за заданный период времени.

### *Численные эксперименты*

Для оценки свойств описанного выше алгоритма были проведены численные эксперименты с модельными данными. В этих экспериментах было задано "истинное значение" концентрации и потоков. При этом были использованы расчеты, полученные с помощью модели MOZART-4 [7]. Затем к "истинным" значениям были добавлены случайные ошибки, тем самым моделировались наблюдения и прогнозы. Для этого были заданы случайные величины, имеющие нормальное распределение с нулевым средним и заданной дисперсией. Затем проводилась оценка потоков по описанному выше алгоритму для одного временного интервала. Полученные в результате экспериментов оценки сравнивались с задаваемой "истинной".

В табл. 1 приведены распределения случайных величин, использованных в экспериментах.

*Таблица 1*

#### Распределения случайных величин

Случайная величина:	Распределение
случайная ошибка наблюдений	$N(0, 10)$
случайная ошибка прогноза (первого приближения)	$N(0, 15)$
случайная ошибка потока	$N(0, 5)$

Были проведены численные эксперименты, в которых был смоделирован поток величиной 30 ppb в одной подобласти. Проводилось два варианта реализации алгоритма: в первом случае не предоставлялась априорная информация (первое приближение) о потоке, а во втором случае было задано модельное первое приближение. Результаты этих экспериментов представлены в табл. 2.

*Таблица 2*

#### Результаты численного эксперимента

Эксперимент:	Ошибка оценки потока (ppb)
без априорной информации	5.2
с первым приближением	2.8

В первом эксперименте, в котором не было предоставлено априорной информации о потоке, была получена ошибка потока в размере 5.2 ppb. Это означает, что модель не смогла точно предсказать реальное значение потока в подобласти. Однако, во втором эксперименте, где было предоставлено первое приближение, ошибка потока составила 2.8 ppb. Таким образом, результаты численного эксперимента показывают, что наличие априорной информации о потоке может значительно повлиять на точность получаемой оценки потока.

Следующей серией экспериментов были численные эксперименты с реальными данными. В рамках численных экспериментов с реальными данными был проведен поиск оценок потоков для подобластей на территории России за 2005 год. Для этого использовались спутниковые данные AIRS за указанный период и результаты расчетов модели MOZART-4 с 1 января 2005 года по 31 декабря 2005 года.

В численных экспериментах проводилось вычисление средних значений оценок потоков метана за период 7 дней внутри подобластей приблизительно одинаковой площади, равной 1000 км на 1000 км. Поскольку шаг сетки модели составляет примерно 2,8°, каждая подобласть содержала 32 узла сетки модели. Внутри каждой подобласти задавались дополнительные точки с использованием линейной интерполяции, в результате чего была получена сетка с шагом 1,4 градуса и 105 узлами сетки для каждой подобласти.

Для каждого узла сетки модели в радиусе 50 км использовались спутниковые данные, по которым было вычислено среднее значение. Кроме того, был проведен этап контроля, во время которого отбрасывались результаты измерений с отклонением от прогноза, превышающим заданное значение.

Оценки потоков, полученные в ходе экспериментов с частотой один раз в 12 часов, были осреднены за недельный период - учитывая частоту спутниковых измерений.

В качестве первого приближения для потоков было принято нулевое значение, поскольку информация об исходных потоках отсутствовала.

При реализации алгоритма LETKF для генерации ансамбля возмущений потоков использовались случайные величины с нормальным распределением, имеющим нулевое математическое ожидание и дисперсию, равную 20.

Для полученных оценок потоков метана был вычислен параметр, характеризующий поведение отклонения полученных оценок от среднего по всей рассматриваемой области. Для набора векторов:  $\{\vec{\varphi}_1, \dots, \vec{\varphi}_n\}$ , где  $\vec{\varphi}_i$  - вектор оценок в момент времени  $t_i$  для всех подобластей вычислялись для каждого временного интервала  $t_i$ :

$$S_i = \sum_{j=1}^L \varphi_i^j / L - \text{среднее по подобласти значение,}$$

$$\sigma_i^2 = \sum_{j=1}^L (\varphi_i^j - S_i)^2 / (L - 1)$$

По этим величинам для каждой подобласти для каждого временного интервала был вычислен параметр  $\lambda_i^j = \frac{|\varphi_i^j - S_i|}{\sigma_i}$ .

На рис. 1 изображено поведение искомого параметра, среднего за месяц, за 2005 год для двух подобластей – подобласть №1, содержащая крупные агломерации и природные источники метана (Васюганские болота НСО и тд). Координаты подобласти 1: с 50° с.ш. до 60° с.ш. и с 60° в.д. до 80° в.д. В качестве подобласти №2 был выбран регион, покрывающий Охотское море, с координатами: с 50° с.ш. до 60° с.ш. и с 140° в.д. до 160° в.д.

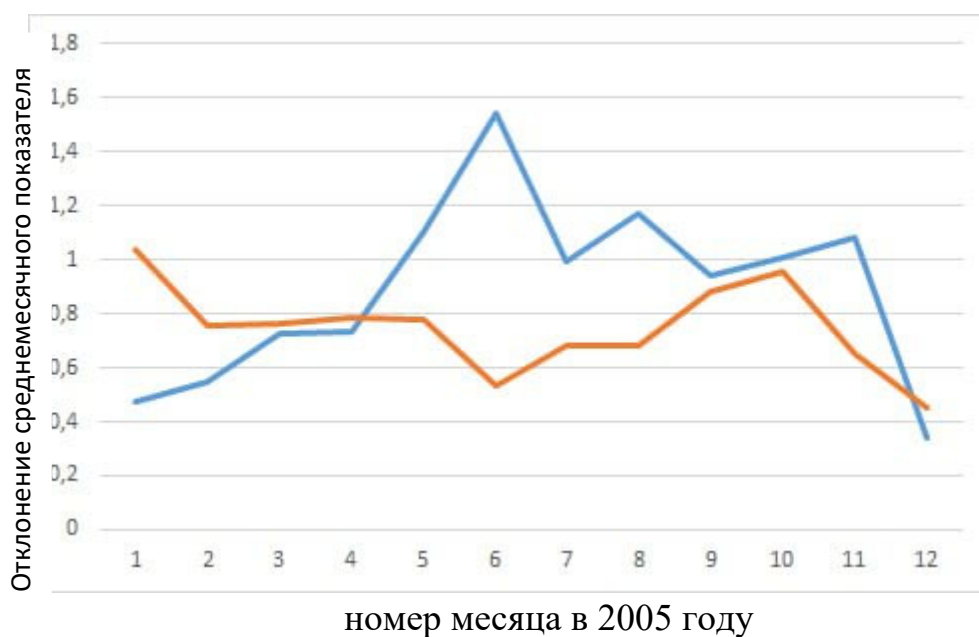


Рис. 1. Поведение осредненного за месяц параметра  $\lambda$ : синим для подобласти №1, оранжевым для подобласти №2

Как видно из рисунка, регион, включающий в себя крупные агломерации и источники, подвержен скачкам по уровню активности полученных оценок потоков метана. Эти скачки могут быть связаны не только с известными природными и антропогенными источниками метана в данной подобласти, но и с началом либо концом отопительного сезона.

На рис. 2, рис. 3 представлено распределение величины параметра  $\lambda$  для 14 подобластей России в течение зимнего и летнего сезонов за 2005 год. Регионы с низкой величиной изменения оценки потоков имеют зеленую окраску, что характеризует стабильную, не сильно меняющуюся картину потоков метана. В свою очередь, красный цвет указывает на повышенную активность региона в плане отклонений оценок потоков от среднего.

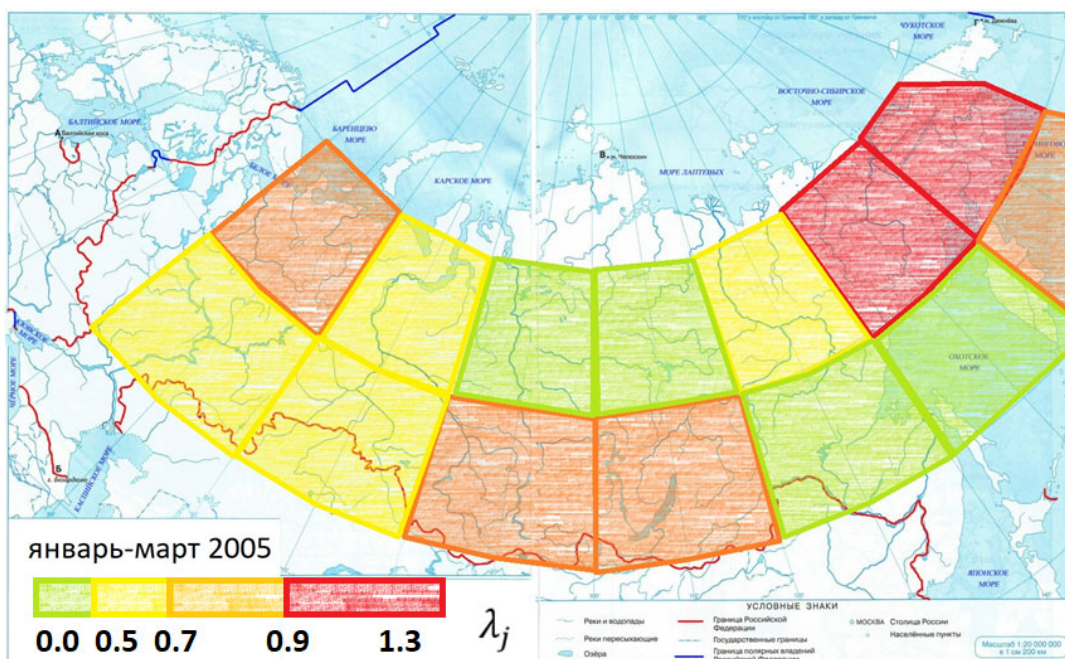


Рис. 2. Отклонения от среднего для параметра  $\lambda$  по подобластям: за зимние месяцы 2005 года

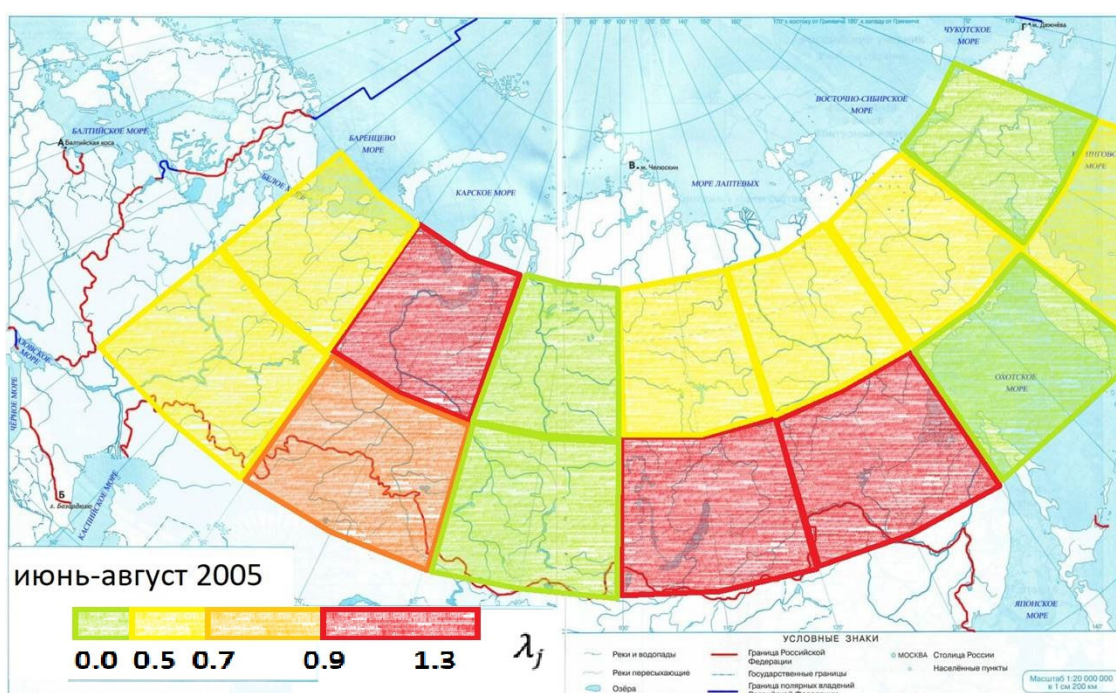


Рис. 3. Отклонения от среднего для параметра  $\lambda$  по подобластям: за летние месяцы 2005 года

### Заключение

Задача оценки состояния окружающей среды по данным наблюдений в настоящее время решается с помощью систем усвоения данных. В работе представлен алгоритм оценки потоков парниковых газов с поверхности Земли по

спутниковым данным и математической модели. Алгоритм представляет собой первый этап разработки системы усвоения данных, полученные результаты можно считать качественной сравнительной оценкой потоков метана для различных регионов.

### *Благодарности*

Авторы статьи выражают глубокую благодарность коллегам – Лагутину Анатолию Алексеевичу и Мордвину Егору.

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

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Nakamura G., Potthast R. Inverse Modeling // – IOP Publishing Ltd., 2015. – 484 p.
2. Bocquet M. et al Data assimilation in atmospheric chemistry models: current status and future prospects for coupled chemistry meteorology models // Atmos. Chem. Phys. Discuss., 2014. – V. 14. – 322 p.
3. Evensen G. Data assimilation. The ensemble Kalman filter. Berlin: Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. – 315 p.
4. Feng L., Palmer P. I., Bosch H. and Dance S. Estimating surface CO<sub>2</sub> fluxes from spaceborne CO<sub>2</sub> dry air mole fraction observations using an ensemble Kalman filter // Atmospheric chemistry and physics. – 2009. – Vol. 9. – 2619 p.
5. 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. – 2789 p.
6. 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. – 1289 p.
7. Mordvin E. Y., Lagutin A. A. Methane in the atmosphere of Western Siberia. – Barnaul: Azbuka, 2016.

© М. В. Платонова, В. Д. Котлер, Е. Г. Климова, 2023