

СИБИРСКИЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ  
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ИЗВЕСТИЯ

Siberian Electronic Mathematical Reports

<http://semr.math.nsc.ru>

---

---

*Том 5, стр. 518–523 (2008)*

УДК 517.988.68

MSC 65R30

ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ТЕРМИЧЕСКОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

В. В. ВАСИН, К. Г. ГРИБАНОВ, В. И. ЗАХАРОВ

**АБСТРАКТ.** For solving nonlinear base equation and finding height profiles of temperature and methane from real spectra measured satellite sensor AQUA, the iterative regularized Newton method and the modified Levenberg-Marquardt method are applied. In result map of full space content of methane for Khanty-Mansiysk region was constructed.

**Keywords:** inverse problem, atmosphere thermal sounding, nonlinear equation system, spectrum satellite data, regular methods.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В последние два года в рамках интеграционного проекта сформировалась тематика, связанная с решением обратных задач термического зондирования атмосферы по определению вертикальных профилей температуры и концентрации парниковых газов по спектрам высокого разрешения, измеренным спутниковым сенсором. Задача сводится к решению сильно переопределенной системы нелинейных уравнений относительно температуры и концентрации газов как функций высоты.

Оказалось, что регулярные алгоритмы, разработанные для уравнений гравиметрии и магнитометрии, при некоторой модификации вполне пригодны для решения задач теплового зондирования. Были выполнены расчеты для

---

VASIN, V.V., GRIBANOV, K.G., ZAKHAROV, V.I., THE INVERSE PROBLEM OF ATMOSPHERE THERMAL SOUNDING.

© 2008 Васин В.В., Грибанов К.Г., Захаров В.И.

Итоговый научный отчет по междисциплинарному интеграционному проекту СО РАН: «Разработка теории и вычислительной технологии решения обратных и экстремальных задач с приложением в математической физике и гравимагниторазведке».

Работа поддержана УрО РАН (Интеграционный проект с СО РАН и ДВО РАН) и частично РФФИ (грант 06-01-00116).

*Поступила 17 июля 2008 г., опубликована 27 ноября 2008 г.*

синтетических и реальных спектров по восстановлению температуры и метана как функций высоты.

Работы по обратным задачам зондирования атмосферы были выполнены совместно с коллегами из лаборатории "Глобальной экологии и спутникового мониторинга" физического факультета Уральского государственного университета им. А.М. Горького.

На основе полученных численных результатов построены карты полного содержания метана в атмосферном столбе для региона Западной Сибири, содержащем Ханты-Мансийский округ.

## 2. Постановка задачи и основные результаты

Метан ( $CH_4$ ) является вторым по значимости парниковым газом после диоксида углерода ( $CO_2$ ), современная концентрация которого приблизительно в 2.5 раза превышает его концентрацию в доиндустриальную эпоху. Вклад метана в увеличившийся парниковый эффект составляет в настоящее время 22% [1]. По некоторым оценкам, только одна треть эмиссии метана на планете обусловлена естественными причинами, остальные же две трети обусловлены деятельностью человека [2]. Несмотря на то, что первые глобальные карты источников и стоков метана уже построены как по результатам спутникового зондирования [3], так и на основе обратного моделирования глобального переноса метана на основе данных, полученных с помощью забора проб [4], Россия, а в особенности ее северная часть, остается на этих картах белым пятном.

Разработка методов определения содержания метана в атмосфере сдерживается тем обстоятельством, что в настоящее время практически не имеется достаточного количества данных о вертикальном распределении метана в атмосфере, полученных непосредственно методом отбора проб воздуха на разных высотах. Последние самолетные измерения метана в атмосфере Западной Сибири относятся к 1994 году [5], в то время как, первый подходящий для глобального мониторинга метана спутниковый сенсор AIRS на борту спутника AQUA был запущен только в 2002 году [6]. В связи с этим была предпринята попытка определить пространственное распределение метана в атмосфере над регионом Западной Сибири, решая базовое уравнение (1) одновременно несколькими методами, развиваемыми в отделе некорректных задач ИММ УрО РАН.

Определение атмосферных параметров из радиометрических измерений сводится к решению системы нелинейных уравнений вида

$$(1) \quad A(u) = f,$$

где  $A$  – нелинейный оператор,  $u = (u_1, u_2, \dots, u_N)^T$  – вектор параметров, включающий в себя в данном случае температуру поверхности, вертикальные профили температуры, влажности и концентрации метана,  $f = (f_1, f_2, \dots, f_M)^T$  – вектор измеренных яркостей в выбранных спектральных каналах. В качестве методов решения системы (1) были приняты итеративно регуляризованный метод Гаусса-Ньютона и модифицированный метод Левенберга-Марквардта с проектированием на априорные ограничения и переменным векторным параметром регуляризации  $\alpha^k(u)$ .

Итерации для первого метода задаются соотношениями

$$(2) \quad u^{k+1} = P_Q\{u^k - [A_k'^T A_k' + \text{diag}(\alpha^k)]^{-1}[A_k'^T(A(u^k) - f) + \text{diag}(\alpha^k)(u^k - u^0)]\},$$

а для второго метода

$$(3) \quad u^{k+1} = P_Q\{u^k - \beta[A_k'^T A_k' + \text{diag}(\alpha^k)]^{-1}A_k'^T(A(u^k) - f)\}.$$

В обеих формулах  $P_Q$  – оператор проектирования на множество, определяемое соотношением (4),  $A_k' = A'(u^k)$  – матрица производных оператора  $A$ ,  $\text{diag}(\alpha^k)$  – в данном случае диагональная матрица, диагональными компонентами которой являются компоненты вектора  $\alpha^k$ . Вектор  $\alpha^k$  определялся как вектор диагональных компонент матрицы  $A_k'^T A_k'$ , умноженных каждая на свой множитель, который был подобран экспериментально для каждого метода в модельных экспериментах, а затем фиксирован для всех экспериментов.

Для обоих методов были заданы априорные ограничения вида

$$(4) \quad u^{\min} \leq u \leq u^{\max}.$$

Для определения содержания метана из множества спектров AIRS было модифицировано программное обеспечение FIRE-ARMS [7].

Для определения метана, были выбраны 307 спектральных каналов прибора AIRS из спектрального интервала 680 – 1340  $\text{см}^{-1}$ , яркость в которых зависит от температуры поверхности, температуры воздуха, влажности и концентрации метана на различных высотах в атмосфере. Выбранный регион был ограничен на западе меридианом  $60^0$  з.д., на востоке –  $90^0$  з.д., на юге параллелью  $60^0$  с.ш., на севере –  $67^0$  с.ш. Был выбран день 27 марта 2004 года, поскольку это уникальный случай, когда практически на всей выбранной территории наблюдалась ясная безоблачная погода при отрицательной температуре поверхности. Зимнее время и данный регион были выбраны еще и потому, что данная территория характеризуется наличием на ней промышленной инфраструктуры связанной с добычей и транспортировкой углеводородов, которая в свою очередь характеризуется наличием утечек метана (в трубопроводах, компрессорных станциях, факелах попутного газа и т.п.). В качестве начального приближения  $u^0$  в части температуры и влажности использовались данные проекта NCEP/NCAR Reanalysis (проект Earth System Research Laboratory действующей в составе NOAA – Национальной администрации по атмосфере и океану США). Данные доступны в сети Интернет по адресу <http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis>. В качестве начального приближения той части вектора  $u^0$ , в которой находятся концентрации метана, использовался высотный профиль метана из модели атмосферы для зимы средних широт.

На рис. 1 представлены примеры восстановленных высотных профилей температуры и метана. Показаны профили начального приближения, верхнее и нижнее ограничения. В силу того, что выбранными методами не представляется возможным осуществить за приемлемое время восстановление атмосферных параметров из каждого измерения AIRS выполненного сенсором в заданный день над заданным районом, была сделана прореживающая выборка из 818 измерений (см. рис. 5).

На основе этих измерений, построены карты полного содержания метана, представленные на рис. 2 и рис. 3. Первая построена с использованием

двух итераций процесса (2), а вторая с использованием не более 5 итераций процесса (3). Для сравнения на рис. 4 представлена карта, построенная с использованием всех без исключения измерений AIRS над заданным районом (всего 8437 измерений), с помощью технологии искусственных нейронных сетей, описанной в [8].

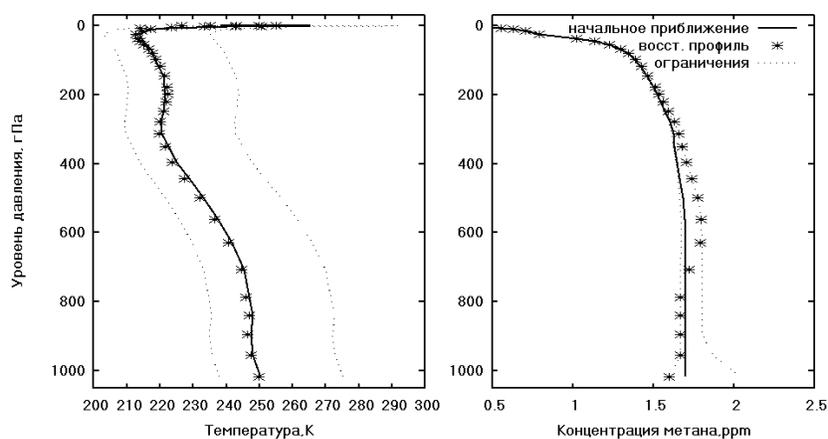


Рис. 1. Пример восстановления высотных профилей температуры (слева) и метана (справа). Показаны начальное приближение (сплошная линия), восстановленный профиль (звездочки), нижнее и верхнее ограничения (пунктир).

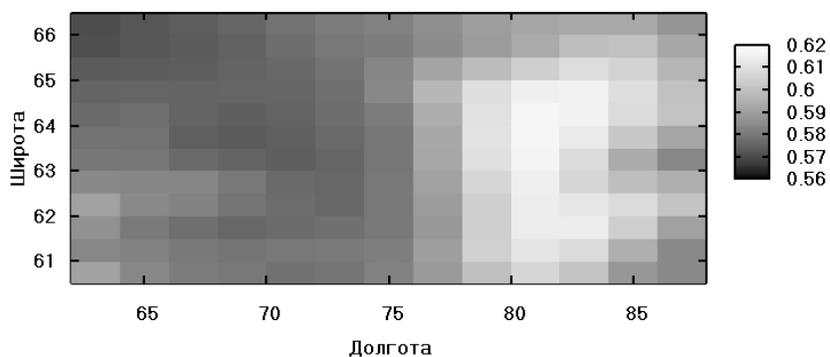


Рис. 2. Карта полного содержания метана в атмосферном столбе (моль/ $m^2$ ), полученная с помощью регуляризованного метода Ньютона-Гаусса (818 измерений).

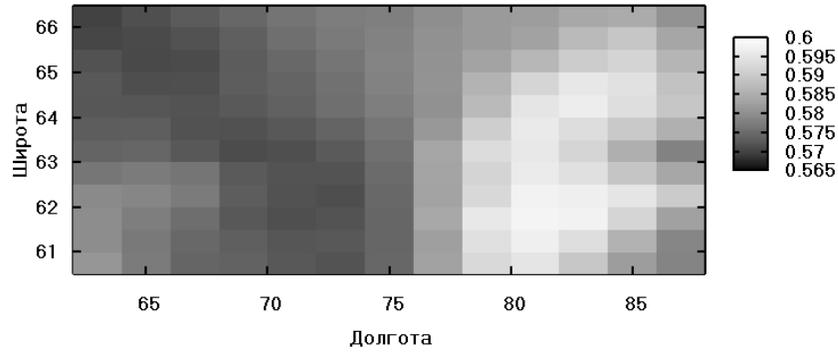


Рис. 3. Карта полного содержания метана в атмосферном столбе (моль/м<sup>2</sup>), полученная с помощью регуляризованного метода Левенберга-Марквардта (818 измерений).

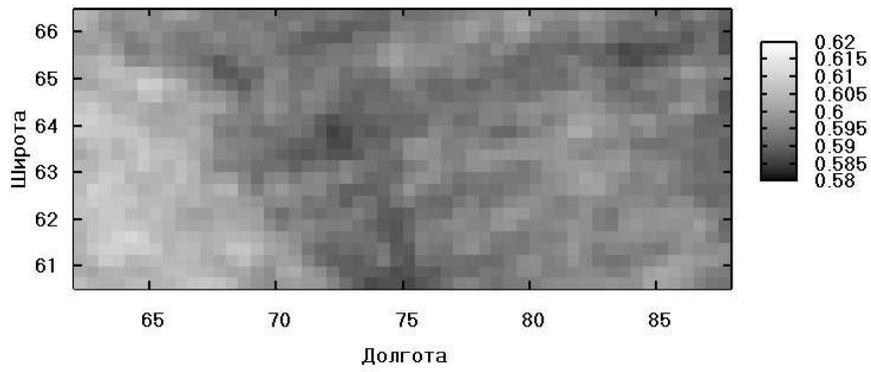


Рис. 4. Карта полного содержания метана в атмосферном столбе (моль/м<sup>2</sup>), полученная с помощью нейронной сети (8437 измерений).

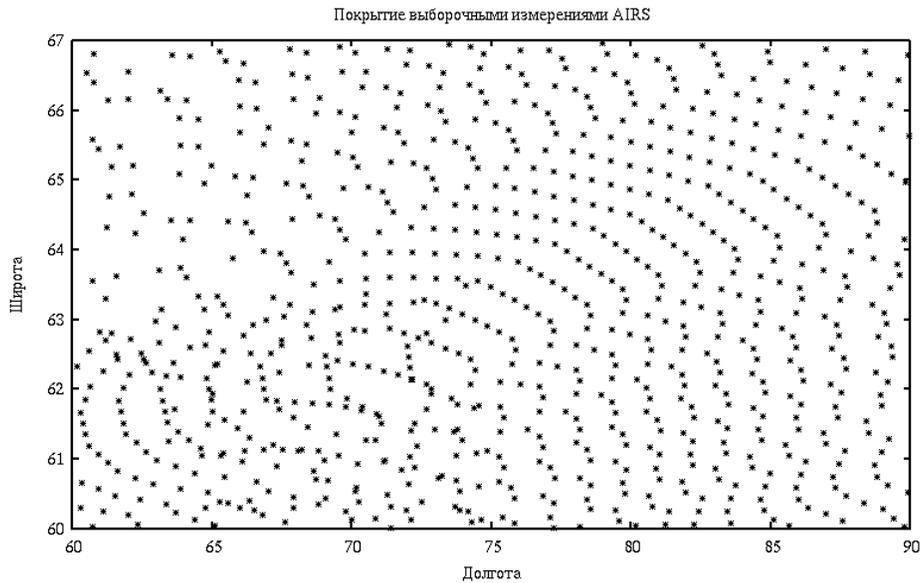


Рис. 5. Восстановленные высотные профили

Сравнение карт полученных различными методами показывает хорошую согласованность результатов между методами (2) и (3). Увеличенные концентрации метана на востоке выбранного региона проявляются и на карте построенной с помощью нейронной сети, однако в целом паттерны содержания метана, полученные методами (2) и (3), отличаются от паттерна, полученного с помощью нейронной сети. В качестве возможных причин расхождения можно назвать случайный выбор точек при выполнении прореживающей выборки, неудачный выбор набора высотных профилей метана в учебном наборе и т.п.

Актуальной задачей является адаптация методов (2) и (3) для определения высотных профилей концентраций других парниковых газов, в частности,  $CO_2$ ,  $CO$ . предварительные численные эксперименты показали, что в этом случае требуется более тонкая настройка управляющих параметров в процессах (2) и (3) (см. [9]). Все это является предметом для дальнейшего изучения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Lelieveld, J., Crutzen, P.J., and Dentender, F.J., *Changing concentration, lifetime and climate forcing of atmospheric methane*, Tellus, 50B (1998), 128–150 .
- [2] Houweling, S., Kaminski, T., Dentender, F.J., Lelieveld, J., Heimann, M., *Inverse modelling of methane sources and sinks using adjoint of a global transport model*, J. Geophys. Res., 104 (1999), 26137–26160.
- [3] Meirink, J.F., Eskes, H.J., and Goede, P.H., *Sensitivity analysis of methane emissions derived from SCIAMACHY observations through inverse modelling*, Atmos. Chem. Phys., 6 (2006), 1275–1292.
- [4] Butler, T.M., Simmonds, I., and Rayner, P.J., *Mass balance inverse modelling of methane in the 1990s using a Chemistry Transport Model*, Atmos. Chem. Phys., 4 (2004), 2561–2580.
- [5] Nakazawa, T., Sugawara, S., Inoue, G., Machida, T., Makshyutov, S., and Mukai H., *Aircraft measurements of the concentrations of  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O$ , and  $CO$  and the carbon and oxygen isotopic ratios of  $CO_2$  in the troposphere over Russia*, J. Geophys. Res., **102**: D3 (1997), 3843–3859.
- [6] Pagano, T.S., Aumann, H.H., Hagan, D.E., Overoye, K., *Prelaunch and in-flight calibration of the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS)*, IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing, 41 (2003), 253–273.
- [7] Gribanov K.G., Zakharov V.I., Tashkun S.A., Tyuterev V.I.G., *A new software tool for radiative transfer calculations and its application to IMG/ADEOS data*, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, **68**: 4 (2001), 435–451.
- [8] Gribanov, K.G., Toptygin A.Yu., Zakharov V.I., *Application of multilayer perceptron to high-resolution infrared measurement retrieval*, SPIE Proc., 6580, 65800R, 2006.
- [9] Грибанов К.Г., Захаров В.И., Васин В.В., *Итеративная регуляризация в задаче содержания  $CO_2$  в атмосфере по данным спутникового зондирования*, Алгоритмический анализ неустойчивых задач (Тез. межд. конф., Екатеринбург, 1–6 сентября 2008 г.). Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2008, 119–120.

Владимир Васильевич Васин  
Институт математики и механики УрО РАН,  
ул. С. Ковалевской 16,  
620219, Екатеринбург, Россия  
E-mail address: vasin@imm.uran.ru