

## **ПРИМЕНЕНИЕ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ РАСЧЕТОВ ПО ДАННЫМ ПРИБОРОВ ИКФС-2 И МТВЗА СПУТНИКА «МЕТЕОР-2»**

### ***Федор Валерьевич Пяткин***

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, ведущий инженер, тел. (953)791-73-57, e-mail: fep@narod.ru

### ***Владимир Викторович Голомолзин***

Сибирский центр Федерального государственного бюджетного учреждения «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета», 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Советская, 30, кандидат технических наук, зав. отделом НИР, тел. (383)363-46-05, e-mail: vvg@rcpod.ru

### ***Анжелика Андреевна Косторная***

Сибирский центр Федерального государственного бюджетного учреждения «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета», 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Советская, 30, младший научный сотрудник, тел. (383)363-46-05, e-mail: kostornaya@rcpod.ru

Рассмотрен регрессионный метод выбора каналов гиперспектральных сенсоров для определения характеристик атмосферы. Метод применялся для расчетов концентрации углекислого газа для инфракрасного Фурье-спектрометра ИКФС-2 и интегрального содержания водяного пара ( $\text{кг/м}^2$ ) в атмосфере для микроволнового зондировщика МТВЗА-ГЯ.

Полученные результаты показали возможность применения данного метода для восстановления значений параметров атмосферы для различных датчиков, а также для расширения возможностей других методов.

**Ключевые слова:** модель атмосферы, инфракрасный спектрометр, МТВЗА, углекислый газ, интегральное влагосодержание.

## **APPLICATION OF REGRESSION ANALYSIS FOR CALCULATIONS UNDER DATA OF IKFS-2 AND MTVZA DEVICES OF METEOR-2 SATELLITES**

### ***Feodor V. Pyatkin***

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Leading Engineer, phone: (953)791-73-57, e-mail: fep@narod.ru

### ***Vladimir V. Golomolzin***

Siberian Centre of State Research Center «Planeta», 30, Sovietskaya St., Novosibirsk, 630099, Russia, Ph. D., Head of Department of Scientific Research, phone: (383)363-46-05, e-mail: vvg@rcpod.ru

### ***Angelica A. Kostornaya***

Siberian Centre of State Research Center «Planeta», 30, Sovietskaya St., Novosibirsk, 630099, Russia, Junior Researcher, phone: (383)363-46-05, e-mail: kostornaya@rcpod.ru

This article examines a multiple regression method to calculate the characteristics of the atmosphere with hyper spectral sensors data of “Meteor-2” satellite. The method was used to calculate the carbon dioxide concentration by infrared Fourier-spectrometer IKFS-2 and the integral content of water vapor of atmosphere for the microwave sensor MTVZA-GY.

Analysis of the obtained results and calculation errors showed the possibility of using this method to restore the values of atmospheric parameters. The proposed method could be applied to for various sensors and it allows to expand the capabilities of other methods.

**Key words:** atmospheric model, infrared spectrometer, IKFS-2, MTVZA-GY, carbon dioxide, integral moisture content.

## *Введение*

Водяной пар и углекислый газ в значительной мере определяют тепловой баланс планеты. Основные газовые составляющие атмосферы имеют постоянное отношение объемных концентраций до высот 80-100 км [1]. При этом наблюдается долговременный тренд увеличения объемной концентрации CO<sub>2</sub>: от приблизительно 280 ppmV в начале 19 века до 400 ppmV к текущему времени.

Всемирной метеорологической организацией (ВМО) сформулированы требования к измерениям параметров атмосферы. Для полного содержания углекислого газа в атмосфере погрешность должна быть не более 0.5 % [2].

Для регулярных измерений CO<sub>2</sub> используются наземные станции и спутниковые приборы. Примерами наземных станций являются международная сеть наземного мониторинга общего содержания углерода в столбе атмосферы TCCON (The Total Carbon Column Observing Network) [3,5] и Глобальная сеть по парниковым газам NOAA, включающая обсерватории Barrow( Alaska), Mauna Loa (Hawaii), American Samoa and South Pole [4]. Для наземных измерений содержания CO<sub>2</sub> в столбе атмосферы используются методы забора и химического анализа проб воздуха, а также Фурье-спектрометры.

С целью долговременного непрерывного мониторинга за состоянием приземной атмосферы над центральной частью Сибири в районе поселка Зотино (60° 48' с. ш., 89° 21' в. д.) была установлена обсерватория Zotino Tall Tower Observatory (“ЗОТТО”), где мониторинг за состоянием атмосферы осуществляется с помощью 301-м мачты [6].

Погрешности наземных измерений связаны со сложностью учета влияния водяного пара, температурной инверсии, антропогенного загрязнения.

К спутниковым приборам, которые использовались или используются для определения концентрации диоксида углерода относятся такие, как SCIAMACHY на КА Envisat, Фурье-спектрометры TANSO-FTS на японском спутнике GOSAT, IASI на спутнике MetOp и AIRS (дифракционный ИК-спектрометр) на AQUA.

Инфракрасный Фурье-спектрометр ИКФС-2, разработанный специалистами Центра Келдыша, функционирующий на КА “Метеор-М” № 2 [7] также позволяет определять объемную концентрации CO<sub>2</sub> [8]. Рабочий диапазон

ИКФС-2 (5-15 мкм) приблизительно соответствует приборам IASI и AIRS и содержит 2701 спектральный канал.

При расчетах концентрации  $\text{CO}_2$  по спектрам в ИК диапазоне используются различные методики расчетов [9,10]. Во всех методиках в качестве расчетных величин и предикторов используются спектральные яркости приходящего излучения либо яркостные температуры, измеренные в спектральных каналах. При этом, возникают значительные ошибки определения концентрации, связанные с зависимостью от состояния атмосферы, в частности профиля водяного пара, наличием облачности в поле зрения прибора, вариациям температуры и излучательной способности земной поверхности [11].

В изучении пространственно-временных распределений водяного пара важное место занимают спутниковые методы оценки содержания водяного пара (по данным КА серий NOAA, Meteosat, DMSP и других). Погрешность измерения для разных методов составляет 10 -30% [12, 13].

Микроволновый зондировщик МТВЗА-ГЯ, установленный на российских КА серии Метеор-М содержит 29 спектральных каналов в диапазоне от 10 до 183 ГГц. Проблема выбора информативных каналов аналогична той, с которой мы сталкиваемся при выборе ИК каналов Фурье-спектрометра. Поэтому авторами предложено использовать одинаковый алгоритм выбора каналов методом регрессионного анализа путем полного перебора сочетаний каналов как для ИКФС-2, так и для МТВЗА-ГЯ.

### *Метод определения коэффициентов регрессии*

Концентрации  $\text{CO}_2$  по данным ИКФС-2 и интегральное содержание водяного пара (влажностное содержание) рассчитываются с помощью полинома второго порядка:

$$C_i = w_0 + \sum_{j=1}^k (w_j x_{i,j} + w_{j+k} x_{i,j}^2), \quad (1)$$

где  $w_0$  и  $w_j$  – коэффициенты регрессии,  $C_i$  – значения измеренных концентраций или величина влагосодержания,  $x_{i,j}$  – значения рассчитанных оптических толщин атмосферы для выбранных  $k$  каналов ИКФС-2, либо их аналога в микроволновом диапазоне.

Определение значений  $w_0$  и  $w_j$  вектора  $W$  производится методом множественной регрессии второго порядка:

$$W = (X^T X)^{-1} X^T C, \quad (2)$$

где  $X$  – матрица измеренных сенсором значений или результатов их обработки.

Дисперсии ошибок,  $D$ , оценивались по значению среднеквадратического отклонения после расчета остаточной суммы квадратов по формуле:

$$D = C^T C - W^T X^T C \quad (3)$$

В качестве исходных данных для расчетов коэффициентов корреляции использовались: данные прибора ИКФС-2, данные прибора МТВЗА-ГЯ, результаты численного анализа GFS NCEP, эталонные данные мачты ZOTTO, Данные Глобальной сети по парниковым газам NOAA [3].

Выбор значимых спектральных каналов их количество и степень полинома для регрессии производился следующим образом:

- выбирались  $k$  из  $n$  каналов,
- для каждого сочетания каналов производился расчет коэффициентов регрессии (2), и среднеквадратической ошибки отклонения линии регрессии по (3),
- из полученных данных выбирались наборы каналов, для которых среднеквадратическое отклонение линии регрессии от данных полигонов минимально.

Для концентрации углекислого газа оптические толщины атмосферы,  $\tau_{i,j}$ , для  $j$ -го канала  $i$ -го пикселя рассчитывались по формуле:

$$\tau_{i,j} = -\ln\left(\frac{R_{i,j}}{Rt_{i,j}}\right) \cos(Z_i), \quad (4)$$

где  $R_{i,j}$  – интенсивность принятого на спутнике излучения из пикселя  $i$  в канале  $j$ ,  $Rt_{i,j}$  – расчетная по функции Планка интенсивность излучения, которую зарегистрировал бы датчик от абсолютно черного тела с температурой  $t$  с поправкой на коэффициент излучения земной поверхности в соответствии с классификацией IGBP [14],  $Z_i$  – зенитный угол пикселя.

Температура  $t$  определяется по данным канала с длиной волны  $900.1 \text{ см}^{-1}$  в окне прозрачности атмосферы.

Для учета поглощения ниже слоя с температурой  $t$ , считалось, что оптическая толщина будет больше рассчитанной по формуле (4) пропорционально количеству молекул в столбе воздуха или давлениям у поверхности Земли и на уровне, соответствующем температуре  $t$ . Профили давления и температур получали из Глобальной системы прогноза (GFS).

Принималось во внимание, что для получения достоверных данных, количество каналов и степень полинома не могут быть большими, так как это уменьшает число степеней свободы в уравнениях регрессии. Кроме того, каналы должны быть близки к окнам прозрачности, с оптической толщиной меньше единицы, в противном случае в расчеты не входит вся толща атмосферы. Выбор каналов производился в диапазоне  $712.5\text{-}764.65 \text{ см}^{-1}$  ( $14.035 - 13.078 \text{ мкм}$ ). Всего 156 каналов. Для расчета температуры использовался канал  $900.1 \text{ см}^{-1}$  ( $11.11 \text{ мкм}$ ). Наличие водяного пара учитывалось по соотношению значений температуры в канале  $900.1 \text{ см}^{-1}$  и  $887.15 \text{ см}^{-1}$  ( $11.272 \text{ мкм}$ ). При этом, число комбинаций, например, 5-ти каналов из 150 составляет около  $7 * 10^{10}$ .

Для расчета коэффициентов регрессии для интегрального влагосодержания в качестве эталонных данных атмосферы были приняты результаты моделирова-

ния уходящего МКВ-излучения. Моделирование производилось посредством радиационной модели (БРМ) программным комплексом SatRas, разработанным Институтом вычислительной математики и математической геофизики СО РАН [15]. Исходными данными для БРМ служили данные профилей Матрикарди [16] и данные реанализа (NCEP/NCAR Reanalysis). Моделирование производилось для всех 29 каналов МТВЗА-ГЯ.

Микроволновое излучение сильно зависит от подстилающей поверхности, поэтому на данном этапе работы метод применялся для поверхности океана. В качестве полигонов использовались безоблачные участки, расположенные над акваториями Тихого, Атлантического или Индийского океанов (до  $\sim \pm 40$  градуса широты). Предварительная обработка состояла в фильтрации облачных пикселей, к которым относились пиксели со значительной разницей яркостных температур в каналах водяного пара 23,8 ГГц вертикальной и горизонтальной поляризации. По разности яркостных температур на двух поляризациях частоты 36,7 ГГц (канал прозрачности атмосферы) был рассчитан индекс для оценки мощности водного запаса:

$$I = \frac{(T_{36,7V} - T_{36,7H})}{(T_{36,7V} + T_{36,7H})} 100, \quad (4)$$

где  $T_{36,7V}$  и  $T_{36,7H}$  – значения яркостных температур для вертикальной и горизонтальной поляризации канала 36,7 ГГц, соответственно.

В зависимости от значения индекса отсеивались точки расположенные над поверхностью земли и классифицированные как облачные.

### ***Результаты***

При расчете концентрации углекислого газа коэффициенты регрессии рассчитывались по данным наблюдений за 2016 год. Это связано с наличием полных данных как наземных наблюдений, так и прибора ИКФС-2 за этот период. Среднеквадратическое отклонение линии регрессии от данных полигона для выбранных коэффициентов регрессии составило не более 2 ppmV.

На рис. 1 показан пример расчета концентрации  $\text{CO}_2$  для смешанной по времени и эталонным полигонам выборки по найденным коэффициентам регрессии.

При расчете интегрального влагосодержания из 29 каналов методом перебора различного количества предикторов был выбран набор каналов с минимальным СКО. Оптимальным оказался набор из 6 каналов: 18.7H, 23.8V, 23.8H, 57+0.32+0.025H (O8), 57+0.32+0.01H (O9), 183+1.4V (HO3). Минимальная величина СКО в тропической зоне составила 4,4 кг/м<sup>2</sup>.

На рис. 2 приведен пример расчета влагосодержания для обучающей выборки по уравнению регрессии и сравнение с измеренными значениями.

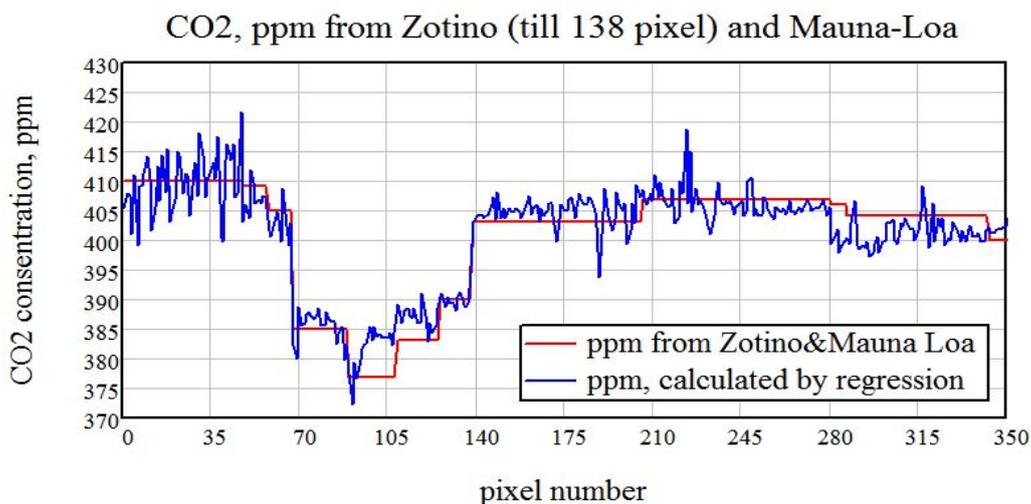


Рис. 1. Пример расчета концентрации, ppmV, и сравнение с измеренными значениями

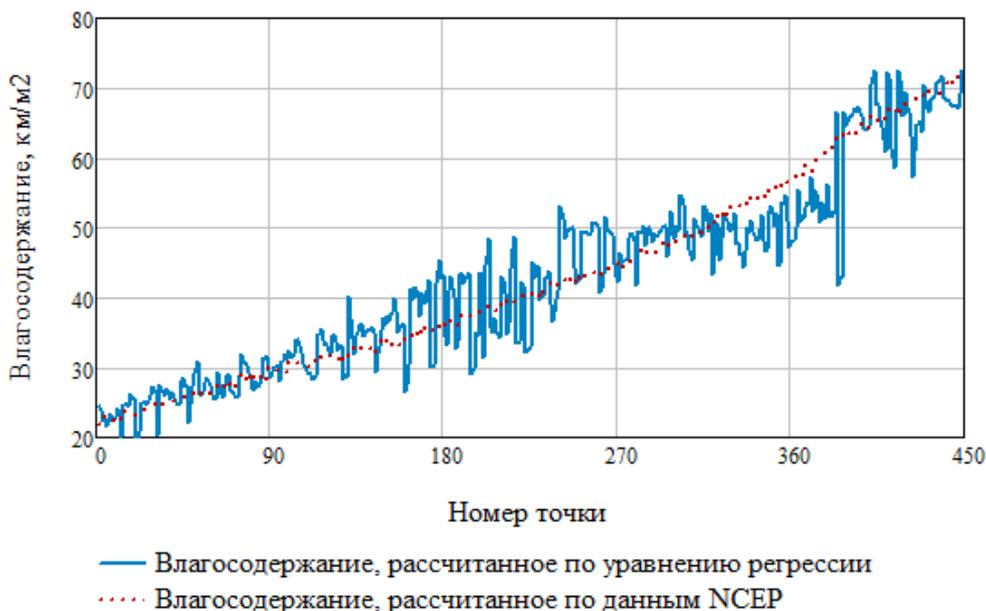


Рис. 2. Распределение значений влагосодержания, рассчитанного по уравнению регрессии и по данным NCEP для учебного набора данных

### *Обсуждение*

Коэффициенты регрессии для углекислого газа рассчитывались по данным наблюдений за 2016 год. Это связано с наличием полных данных для наземных наблюдений, за этот период. Эти же коэффициенты регрессии были использованы для расчетов концентрации  $\text{CO}_2$  в 2017 и начале 2018 г. Среднеквадратические отклонение линии регрессии от данных полигона для выбранных коэф-

фициентов регрессии, рассчитанные для измерений концентрации  $\text{CO}_2$  оставались стабильными.

Коэффициенты регрессии для влагосодержания рассчитывались по данным наблюдений за 2016 год. Для валидации алгоритма использовались архивные данные МТВЗА-ГЯ за 2016-2017 г. Выборка включала 11794 пикселя. Для линейной регрессии СКО составило  $9,15 \text{ кг/м}^2$ , для регрессии полиномом второго порядка  $5,30 \text{ кг/м}^2$ .

### ***Заключение***

Применение регрессионного анализа для расчета параметров атмосферы позволило получить результаты не хуже, чем при использовании специализированных программ. При этом используется универсальный подход для определения предикторов и коэффициентов уравнения. Использование современных производительных компьютеров позволяет автоматически выбрать набор предикторов и затем истолковать их физическое значение.

Для различных природно-климатических условий и разной подстилающей поверхности возможно потребуется использование разных уравнений регрессии.

Например, в зимний период, при температурной инверсии до нескольких километров алгоритм расчета концентрации  $\text{CO}_2$  требует корректировки.

Разработанная методика интерпретации спутниковых данных позволяет определить запас водяного пара в атмосфере над безоблачной поверхностью океана с достаточной для глобального алгоритма точностью. Для восстановления влагосодержания безоблачной атмосферы над сушей необходимо учитывать излучательные свойства поверхности в микроволновом диапазоне.

### ***Благодарности***

Авторы выражают признательность д. физ.-мат. н. Рублеву А. Н. за идеи и помощь, без которой разработка методики была бы невозможной, а также коллективу ИВМиМГ СО РАН под руководством д. т. н. Пяткина В. П. за разработанное программное обеспечение для расчета исходящего излучения.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Тимофеев Ю. М., Васильев А. В. Теоретические основы атмосферной оптики. – СПб. : Наука, 2003. – 474 с.
2. Тимофеев Ю. М. Глобальная система мониторинга параметров атмосферы и поверхности. – СПб, 2009. – 129 с.
3. The Total Carbon Column Observing Network (TCCON) / D. Wunch, G. Toon, J.-F. L. Blavier, R. A. Washenfelder, J. Notholt, B. J. Connor, D. W. T. Griffith, V. Sherlock, P. O. Wennberg // Philosophical Transactions of Royal Society A. – 2011. – V. 369 (1943). – P. 2087–2112.
4. Earth System Research Laboratory [Электронный ресурс]. – Mode of access : <https://www.esrl.noaa.gov> (дата обращения: 30.03.2019).

5. Бюллетень ВМО по парниковым газам. Всемирная метеорологическая организация [Электронный ресурс]. – 2017. – № 13. – Mode of access : [https://library.wmo.int/opac/doc\\_num.php?explnum\\_id=4022](https://library.wmo.int/opac/doc_num.php?explnum_id=4022) (дата обращения: 30.05.2018).
6. ZOTTO project [Электронный ресурс]. – Mode of access : <http://www.zottoproject.org/> (дата обращения: 01.12.2018).
7. Технологический образец бортового инфракрасного Фурье-спектрометра ИКФС-2 для температурного и влажностного зондирования атмосферы Земли / Ф. С. Завелевич, Ю. М. Головин, А. В. Десятов и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2009. – Т. 6. – № 1. – С. 259–266.
8. Гаркуша А. С., Поляков А. В., Тимофеев Ю. М. Анализ возможностей мониторинга характеристик газового состава атмосферы с помощью спутниковой аппаратуры ИКФС-2 // Исследование земли из космоса. – 2016. – № 5. – С. 38–41.
9. Retrieval algorithm for CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> column abundances from short - wavelength infrared spectral observations by the Greenhouse Gases Observing Satellite / Y. Yoshida, Y. Ota, N. Eguchi, N. Kikuchi, K. Nobuta, H. Tran, I. Morino, T. Yokota // Atmospheric Measurement Techniques Discussions. – 2010. – No3. – С. 4791–4833.
10. Поляков А. В., Тимофеев Ю. М., Успенский А. Б. Температурно-влажностное зондирование атмосферы по данным спутникового ИК зондировщика высокого спектрального разрешения ИКФС-2 // Исследование земли из космоса. – 2009. – № 5. – С. 3–10.
11. Мониторинг концентраций диоксида углерода и общего содержания метана в тропосфере над Сибирью по данным спутниковых ИК-зондировщиков AIRS, IASI / А. Б. Успенский, А. В. Кухарский, С. В. Романов, А. Н. Рублев // Исследование Земли из космоса. – 2011. – № 1. – С. 14–21.
12. Образцов С. П., Шукин Г. Г. Восстановление метеорологических характеристик атмосферы и темп подстилающей поверхности по данным спутниковых измерений // Методы и устройства передачи и обработки информации. – 2001. – №1. – С.92-96.
13. Караваев Д. М., Шукин Г. Г. Метод микроволновой радиометрии атмосферы в задачах валидации спутниковой информации и радионавигационного обеспечения // VII Всероссийские Армандовские чтения: молодая школа. Муром, 27-29 июня, Сборник трудов конференции, 2017. – С. 22–32.
14. Climate Data Guide [Электронный ресурс]. – Mode of access : <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/ceres-igbp-land-classification> (дата обращения: 29.03.2019).
15. Быстрая радиационная модель для анализа данных спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения / В. П. Пяткин, А. Н. Рублев, Е. В. Русин, А. Б. Успенский // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 1. – С. 190–194.
16. Matricardi M. The generation of RTTOV regression coefficients for IASI and AIRS using a new profile training set and a new line-by-line database. Final Report EUMETSAT // ECMWF Technical memorandum №.564. – 2008. – 49 p.

© Ф. В. Пяткин, В. В. Голомолзин, А. А. Косторная, 2019