Мониторинг содержания газов в атмосфере на основе данных Д33 в Дальневосточном центре ФГБУ «НИЦ «Планета»

А.А. Филей

Дальневосточный центр ФГБУ «НИЦ «Планета» Хабаровск, 680000, Россия E-mail: vmer@dvrcpod.ru

В работе приводятся результаты исследования возможности использования спутниковой информации для восстановления концентраций различных газов в атмосфере с целью их мониторинга. К числу таких газов относятся диоксид углерода (CO₂), оксид углерода (CO), азот (N₂), двуокись серы (SO₂), оксид серы (SO), метан (CH₄) и др. На сегодняшний день на основе спутниковой информации, принимаемой в Дальневосточном центре ФГБУ «НИЦ «Планета» на собственные антенны, программно реализованы методы восстановления концентрации двуокиси серы и метана, а также содержание аэрозолей. Помимо этого исследуется возможность восстановления содержания в атмосфере других газов и применения их концентраций для мониторинга и картирования дымовых шлейфов пожаров и вулканических выбросов. К настоящему времени многими авторами проведены работы по верификации алгоритмов расчета концентрации атмосферных газов по данным спутниковых сенсоров, что позволяет осуществлять на основе этого постоянный мониторинг загрязнения атмосферы. Дальневосточный центр проводит постоянный мониторинг содержания газов в атмосфере на основе данных ДЗЗ, в связи с чем при анализе полученных карт концентрации газов наблюдалась хорошая согласованность с наблюдениями специалистов Центра за вулканической активностью Камчатки, пожарной обстановкой ДФО. Фиксируемые концентрации до и после наблюдаемых процессов соответствуют их смещению в соответствии с воздушным потоком в свободной атмосфере.

Ключевые слова: мониторинг, атмосфера, парниковые газы, спектр, эмиссия, аэрозоли

Введение

В Дальневосточном регионе сосредоточено большое количество источников эмиссии (выбросов) в атмосферу газов природного и антропогенного происхождения: вулканы Камчатки, ежегодные крупномасштабные лесные пожары, сельскохозяйственные палы и т.д. Различают атмосферные газы с длинным жизненным циклом (CO₂, метан (CH₄) и диоксид азота (NO₂)) и коротким циклом (например, сернистый газ (SO₂) и угарный газ (CO)).

К первой категории относятся химически стабильные газы, которые хорошо перемешиваются в атмосфере и не распадаются в течение длительного времени, и их глобальные концентрации можно точно восстановить. Ко второй группе относятся газы, которые в результате химических реакций в атмосфере довольно быстро распадаются, поэтому их концентрации крайне непостоянны.

Таким образом, точность оценки эмиссии газов в атмосферу напрямую зависит от количества и масштабов районов исследований, а также от оперативности проведения замеров. Поэтому в последние годы при решении задач количественной и качественной оценки поступления газов в атмосферу на первый план выходит использование данных спутникового зондирования.

Технические возможности приема и обработки информации, которые в настоящее время имеет Дальневосточный центр, позволили программно реализовать методы восстановления концентрации некоторых из перечисленных газов на основе данных спектрометров AIRS (KA «Aqua»), CrIS и OMPS (KA «Suomi NPP»), IASI (KA «Metop-B»).

Методы восстановления

Для восстановления концентрации атмосферных газов используются методы (*puc. 1*), основанные на поглощении излучения в инфракрасной и ультрафиолетовой областях электромагнитного спектра (Захаров, 2009).



Рис. 1. Методы восстановления концентрации атмосферных газов

Метод теплового излучения использует измерения спектральной яркости излучения атмосферы и описывается уравнением теплопереноса (1), решение которого позволяет восстановить параметры атмосферы:

$$I_{\lambda}^{up} = I_{\lambda}^{surf} + \int_{0}^{H} (B_{\lambda}(\mathbf{T}(\mathbf{h})) \,\mathrm{d}\,\tau_{\lambda}(h, \sum_{j=1}^{N} q_{j}(h)) \,/ \,dh) dh, \tag{1}$$

где I_{λ}^{up} – поток ИК радиации, регистрируемый спутниковым сенсором, I_{λ}^{surf} – поток ИК радиации, излучаемый подстилающей поверхностью, B_{λ} – функция Планка, – функция температуры от высоты h атмосферного слоя, λ – длина волны, τ_{λ} – коэффициент пропускания атмосферы, $q_j(h)$ – профили концентраций j газа (j=1...N, где N – количество газов), H – максимальная высота.

Метод ультрафиолетового излучения использует измерения отраженного и рассеянного излучения. В основе данного метода лежит уравнение Ламберта – Бира (2) :

$$I_{\lambda}^{up} = I_{\lambda}^{0} \exp\left[-\int_{j=1}^{N} (\rho_{j}(h)\sigma_{j}(\lambda,h) + \varepsilon_{M}(\lambda,h) + \varepsilon_{R}(\lambda,h)) dh\right],$$
(2)

где I_{λ}^{up} – поток ИК радиации, регистрируемый спутниковым сенсором, I_{λ}^{0} – поток излучения отраженный от поверхности земли, λ – длина волны, σ_{i} – сечение поглощение j газа

(N – количество газов), ρ – массовая доля газа в слое шириной h, ε_M и ε_R – рассеяние Ми и Релея.

Общая схема, описывающая процесс восстановления газов, представлена на *рис. 2*. Данная схема позволяет на этапе предварительных расчетов вносить изменения в базовые параметры алгоритма расчета. Это параметры атмосферы, восстанавливаемые на основе спутниковых данных по методам, адаптированным к Дальневосточному региону, модифицированная маска облачности и модель атмосферы для заданного региона за разные времена года.



Рис. 2. Процесс восстановления атмосферных газов

Спектральный анализ поглощения атмосферных газов

Радиационный перенос в атмосфере определяется содержанием газов, поглощающих излучение, таких, как водяной пар, двуокись углерода, метан, озон, окись азота и др. Каждый атмосферный газ на определенной частоте в большей степени поглощает восходящую радиацию, чем другие газы.

Для газов, поглощающих излучение в инфракрасной области спектра, вводят такое понятие, как интенсивность поглощения газом фотонов света. На *рис. 3* представлена интенсивность поглощения некоторых атмосферных газов в инфракрасном диапазоне частот.



Рис. 3. Интенсивность поглощения атмосферных газов

В ультрафиолетовой области спектра процессы поглощения излучения связаны с другим параметром – сечением поглощения. Данный параметр показывает эффективную площадь молекулы, пройдя через которую фотон света поглощается. Чем больше сечение, тем эффективнее происходит поглощение света. На *рис. 4* представлены сечения поглощений некоторых атмосферных газов в ультрафиолетовом диапазоне частот.



Рис. 4. Сечения поглощения атмосферных газов

Анализ информационной продукции

Одним из продуктов, который удалось восстановить методом решения уравнения теплопереноса, является угарный газ. На *рис. 5* отображена повышенная концентрация угарного газа в атмосферном столбе на территории Якутии в период сложной пожарной обстановки 2014 г. в этом регионе. Концентрация угарного газа была рассчитана с помощью алгоритма, разработанного Лабораторией реактивного движения Калифорнийского технологического института. Погрешность алгоритма расчета для сенсора AIRS составляет порядка 15% (www.airs.jpl.nasa.gov/weather_and_climate_sciences /composition).



Рис. 5. Концентрация угарного газа в атмосферном столбе по данным сенсора AIRS (22 июля 2014 г. 03.41 GMT, 05.23 GMT)

В отсутствии данных наземных и самолетных измерений концентрации угарного газа было предложено, что районы его повышенной концентрации должны быть неразрывно связаны с другим немаловажным компонентом процесса горения – аэрозолями. Разрешение сенсора VIIRS спутника «Suomi NPP» позволяет классифицировать различные виды аэрозолей: дым, песчаную пыль, морскую взвесь и др. Рассчитав оптическую толщину и вид аэрозольных фракций, удается детектировать дым от лесных пожаров и восстановить его концентрацию (*puc. 6*).

На *рис.* 6 видно, что повышенная концентрация соответствует той территории, где детектируются точки возгораний за указанный период времени.



Рис. 6. Цветосинтезированное изображение с сенсора VIIRS (7 августа 2014 г. 03.34 GMT) а) с маской дымов; б) без маски дымов

При совмещении карт дыма и угарного газа (*puc.* 7) можно заметить, что границы контуров повышенной концентрации практически совпадают, а направление смещения шлейфов соответствует воздушным потокам в свободной атмосфере.

Еще одним направлением, которым в настоящее время занимается Дальневосточный центр ФГБУ «НИЦ «Планета» совместно с Институтом Вулканологии ДВО РАН, является мониторинг выбросов диоксида серы (SO₂) в результате вулканической деятельности.



Рис. 7. а) изображение с сенсора VIIRS и наложенной маски дымов (24 июля 2014 г. 04.39 GMT); б) концентрация угарного газа (24 июля 2014 г. 01.47 GMT, 03.29 GMT)

В настоящее время в оперативной работе специалистов используются данные восстановленной концентрации диоксида серы на основе измерений в ультрафиолетовом диапазоне сенсором OMI (KA AURA) и OMPS. Продукция с данных сенсоров представлена для 4 различных уровней концентрации: приземный уровень, уровень нижней тропосферы, уровень средней тропосферы, а также уровень верхней тропосферы и стратосферы (Krotkov, 2006). Для каждого уровня существует своя среднеквадратическая ошибка.

Учитывая параметры ошибок и то, что извержения взрывного характера явление крайне редкое, мы осуществили восстановление концентрации диоксида серы в атмосферном столбе от 5 до 10 км (соответствует уровню 7,5 км) по данным сенсора OMPS.

На *рис.* 8 представлена восстановленная концентрация диоксида серы по двум спутниковым сенсорам OMPS и OMI. Предварительно также была рассчитана площадь газового облака и его масса.



Рис. 8. Концентрация диоксида серы (13 августа 2014 г.): а) по данным сенсора ОМІ (01.30 GMT); б) по данным сенсора ОМРЅ (01.44 GMT)

Согласно статистическим данным Института Вулканологии ДВО РАН, восстановленная концентрация диоксида серы с ультрафиолетовых сенсоров дает большие погрешности для Камчатского региона в период с октября по март. В связи с этим в Дальневосточном центре был реализован алгоритм восстановления диоксида серы методом Prata и Bernardo по данным инфракрасных спектрометров AIRS (Prata and et al., 2007). Преимущество инфракрасных сенсоров перед ультрафиолетовыми состоит еще и в том, что они позволяют фиксировать выбросы газа в ночное время. Так как основная концентрация водяного пара сосредоточена в низких слоях атмосферы, ближе всего к поверхности, то расчет концентрации диоксида серы производится в атмосферном слое от 5 до 15 км, где влияние водяного пара становится минимальным. При расчете концентрации диоксида серы для двух небольших областей между 1320–1335 см⁻¹ и 1342–1358 см⁻¹ делается коррекция спектра связи с поглощением водяного пара в этом спектральном диапазоне.

На *рис. 9* представлено изображение восстановленной концентрации диоксида серы по данным сенсора AIRS.



Рис. 9. Концентрация диоксида серы по данным сенсора AIRS (23 ноября 2014 г. 02.24 GMT)

Еще одним параметром, который служит для оценки загрязняющих атмосферу веществ, является аэрозольный индекс (*puc. 10*). Для восстановления аэрозольного индекса используются сенсоры OMPS, GOME-2, OMI.

Многие мелкодисперсные элементы, которые охватывает аэрозольный индекс, имеют скорости распространения в атмосфере, значительно превышающие аналогичный параметр для атмосферных газов. Этот фактор позволяет использовать аэрозольный индекс как компас при оценке направления и скорости переноса более крупных и твердых частиц.



Рис. 10. Аэрозольный индекс атмосферы по данным сенсора OMPS (24 июля 2014 г. 04.37 GMT)

Заключение

В настоящее время в Дальневосточном центре ФГБУ «НИЦ «Планета» активно продолжается проведение работ по восстановлению концентраций атмосферных газов. В ближайших планах Дальневосточного центра – на основе спутниковых данных осуществить детектирование таких газов, как CO₂, NO₂ и ряда других.

В будущем получение оперативных данных о широком перечне параметров аэрозольной и газовых компонентов атмосферы на основе спутниковых и наземных сетевых измерений позволит решать комплексные задачи распространения этих параметров в атмосфере.

Литература

 Olsen E.T. AIRS Version 5 Release Level 2 Standard Product QuickStart // Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, Pasadena, 2007. P. 52–59.

Захаров В.И. Исследование устойчивости теплового режима поверхности Земли и расчет параметров атмосферы по ИК спектрам высокого разрешения: Дис.... докт. физ.-мат. наук: 01.04.14. Уральский государственный университет им. А.М. Горького, 2009. 315 с.

^{ственный университет им. А.М. Горького, 2009. 315 с.} *Carn, S.A., Krotkov N.A., Yang K., Hoff R.M., Prata A.J., Krueger A.J., Loughlin S.C., Levelt P.F.* Extended observations of volcanic SO2 and sulfate aerosol in the stratosphere // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2007. No. 7. P. 2857–2871.

Krotkov, N. A., Carn, S. A., Krueger, A. J., Bhartia, P. K., Yang, K. Band residual difference algorithm for retrieval of SO2 from the Aura Ozone Monitoring Instrument (OMI) // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, AURA Special Issue. 2006. Vol. 44. P. 1259–1266.

- Orphala J., Chanceb K. Ultraviolet and visible absorption cross sections for HITRAN // Journal of Quantitative 5. Spectroscopy and Radiative transfer. 2003. Vol. 82. P. 491–504.
- Prata, A. J., Bernardo C. Retrieval of volcanic SO2 column abundance from Atmospheric Infrared Sounder data 6. // Journal of geophysical research. 2007. Vol. 112. P. 17.
- 7. http://www.spectralcalc.com.
- https://airs.jpl.nasa.gov/weather_and_climate_sciences/composition. 8

Monitoring of gases in the atmosphere based on remote sensing data in the Far-Eastern Center of State Research Center for Space Hydrometeorology "Planeta"

A.A. Filei

Far-Eastern Center of State Research Center for Space Hydrometeorology "Planeta" Khabarovsk 680000, Russia *E-mail: vmer@dvrcpod.ru*

In this paper, we investigate the possibility of using satellite data to determine the concentration of various gases in atmosphere for the purpose of monitoring. These gases include carbon dioxide (CO2), carbon monoxide (CO), nitrogen (N2), sulfur dioxide (SO2), sulfur oxide (SO), methane (CH4) and others. Today, in the Far-Eastern Center of State Research Center for Space Hydrometeorology "Planeta" a method was implemented for retrieving the concentration of sulfur dioxide, methane and aerosols using the information received by ground stations. Also we investigate the possibility to retrieve concentrations of other gases in the atmosphere. The concentrations of these gases are used for monitoring and mapping fires and smoke plumes and volcanic eruptions. The obtained gas concentration data was in good agreement with the observations of the experts for volcanic activity in Kamchatka region and fire situation of Russian Far East. These concentrations observed before and after shift processes match the corresponding air flows in a free atmosphere.

Keywords: monitoring, atmosphere, greenhouse gases, spectra, emission, aerosols

References

- Zakharov V.I. Issledovaie ustoichivosti teplovogo rezhima poverhnosti Zemli i raschet parametrov atmosferi po 1. IK spektram visokogo razresheniay, Dis. ... dokt. fiz.-mat. nauk (The research of the stability of the thermal mode of the Earth's surface and atmospheric parameters for the calculation of the IR spectra of high-resolution, Doct.
- Phys.-Math. Sci. Theses), Uralskiy gosudarstvennyy universitet, 2009, 315 p. Carn, S.A., Krotkov N.A., Yang K., Hoff R.M., Prata A.J., Krueger A.J., Loughlin S.C., Levelt P.F. Extended observations of volcanic SO2 and sulfate aerosol in the stratosphere, *Atmos. Chem. Phys. Discuss*, 2007, pp. 2857–2871. Krotkov, N. A., Carn, S. A., Krueger, A. J., Bhartia, P. K., Yang, K. Band residual difference algorithm for retrieval 2
- 3. of SO2 from the Aura Ozone Monitoring Instrument (OMI), *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, AURA Special* Issue, 2006, Vol. 44, pp. 1259-1266.
- Olsen E.T. *AIRS Version 5 Release Level 2 Standard Product QuickStart*, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, Pasadena, 2007, pp. 52–59. Orphala J., Chanceb K. Ultraviolet and visible absorption cross sections for HITRAN, *Journal of Quantitative* 4.
- 5. Spectroscopy and Radiative transfer, 2003, Vol. 82, pp. 491–504. Prata, A. J., Bernardo C. Retrieval of volcanic SO2 column abundance from Atmospheric Infrared Sounder data,
- 6. Journal of geophysical research, 2007, Vol. 112, 17 p.
- 7 http://www.spectralcalc.com.
- https://airs.jpl.nasa.gov/weather and climate sciences/composition. 8