

УДК 551.501: 629.195.1

Доктор техн. наук	А.Х. Ахмеджанов <sup>1</sup>
Канд. техн. наук	Т.К. Караданов <sup>1</sup>
Канд. физ.-мат. наук	Н.Д. Ахметов <sup>1</sup>

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА ПО ТЕРРИТОРИИ КАЗАХСТАНА НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

**Ключевые слова:** атмосфера, углекислый газ, концентрация, вертикальный профиль, спутник, зондирование

*Рассмотрено распределение углекислого газа в атмосфере по данным космического зондирования на территории Казахстана. Получены результаты статистического анализа изменений концентрации углекислого газа по территории Казахстана за период 2003...2016 годы. В среднем по территории Казахстана с 2003 года по 2016 год концентрация углекислого газа увеличилась на 7,75 %.*

В связи с активным использованием человечеством ископаемых энергоносителей в качестве топлива, происходит быстрое увеличение концентрации этого газа в атмосфере. Наибольший вклад в глобальное потепление вносит углекислый газ CO<sub>2</sub>, по современным оценкам его влияние составляет 60...70 % [2]. Поскольку углекислый газ химически пассивен, его «время жизни» в атмосфере нескольких десятков лет. Как следствие, меры, направленные на сокращение антропогенной эмиссии CO<sub>2</sub>, скажутся лишь через несколько десятилетий. В этой ситуации сегодня активно предлагается идея сокращения выбросов других газов и аэрозолей, воздействие которых на радиационный режим и на климат тоже значительно, но их время пребывания в атмосфере существенно короче (недели, месяцы или годы), а значит, и отклик климатической системы может проявиться быстрее [1, 3].

Отличительной особенностью парниковых свойств двуокиси углерода по сравнению с другими газами является её долговременное воздействие на климат. Углекислый газ, несмотря на относительно небольшую концентрацию в воздухе является важным компонентом земной атмосферы. Он поглощает и переизлучает инфракрасное излучение на различных длинах волн, включая длину волны 4,26 мкм (вибрационный режим –

<sup>1</sup> АО «НЦКИТ» НКА РК, г. Алматы, Казахстан

асимметричное растяжение молекулы) и 14,99 мкм (изгибные колебания). Данный процесс исключает или снижает излучение Земли в космос на этих длинах волн, что приводит к парниковому эффекту. Текущее изменение концентрации атмосферного CO<sub>2</sub> сказывается в полосах поглощения, где его современное влияние на спектр переизлучения Земли приводит только к частичному поглощению [8].

В вегетационный период в Северном полушарии наблюдается периодическое изменение концентрации CO<sub>2</sub> амплитудой 3...9 ppm. Влияние растительности Северного полушария доминирует в годовом цикле концентрации CO<sub>2</sub>. Уровень достигает максимума в мае и минимума в октябре, когда количество биомассы, осуществляющее фотосинтез, является наибольшим [4, 5, 7, 10, 11].

В настоящее время интенсивно развиваются методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), основанные на применении инфракрасных спектрометров-радиометров высокого разрешения. В разных странах были запущены приборы: AIRS, IASI, TANSO-FTS, MIPAS, TES и другие, со спектральным разрешением, волновое число которых порядка 0,02...0,5 см<sup>-1</sup>. Они показали свою эффективность в исследованиях температуры подстилающей поверхности, стратификации атмосферы, парниковых газов, химических процессов в тропосфере и стратосфере. Это связано с тем фактом, что в тропосфере и нижней стратосфере, т.е. в наиболее деятельном и важном слое атмосферы, полуширины спектральных линий атмосферных газов пропорциональны давлению. Высокое спектральное разрешение позволяет получать информацию об атмосфере с меньшим искажением.

Глобальный атмосферный реанализ спутниковых данных (MERRA) осуществляется НАСА (GMAO) на уровне глобального управления, моделирования и ассимиляции спутниковых данных. Цели MERRA-2 заключаются в том, чтобы обеспечить систематизированный, однородный учет глобальной атмосферы и включить дополнительные аспекты климатической системы, включая газовые компоненты и улучшенное представление поверхности Земли. MERRA-2 является одним из первых глобальных реанализов спутниковых данных для ассимиляции космических наблюдений газов и аэрозолей, а также представления их взаимодействия с другими физическими процессами в климатической системе. MERRA-2 предназначен заменить первоначально продукт MERRA, и отражает современные достижения в моделировании атмосферы и усваивании данных. Эти данные представлены на геопортале Giovanni. На кратко-

срочных ежедневных выборках по территории Казахстана на ряде участков нет данных. В случае небольших участков в два-три пикселя можно использовать методы интерполяции. Но во многих случаях это большие территории. Поэтому необходимо восстанавливать на этих участках необходимые данные расчетными методами.

В случае длинноволновой радиации можно пренебречь рассеянием и считать, что выполняются условия термодинамического равновесия, при котором основные величины этой системы (температура, давление, объём, энтропия) колеблются возле своих средних значений с небольшими отклонениями при отсутствии сильного внешнего вмешательства. Измеряемое спутниками тепловое излучение, есть сумма всех излучений элементарных слоев атмосферы, характеризующееся функцией ослабления теплового излучения  $F_\lambda(p)$ , зависящая от давления  $P$  и температуры  $T(p)$ , а также от длины волны  $\lambda$  (или частоты  $\nu$ ), на котором фиксируется излучение, угла визирования  $\vartheta$  со спутника.

Интенсивность восходящего теплового излучения в атмосфере уравнение переноса в изобарической системе координат можно представить в виде:

$$J_\lambda^\uparrow(p) = B_\lambda[T(p_0)] \cdot F_\lambda(p_0) + \int_{p_0}^0 B_\lambda[T(p)] \frac{dF_\lambda(p)}{dp} dp,$$

где  $J_\lambda^\uparrow(p)$  – восходящее тепловое излучение,  $B_\lambda[T(p)]$  – функция Планка,  $p_0 = 1000 \text{ гПа}$  – давление на земной поверхности.

Функция ослабления теплового излучения определяется в виде

$$F_\lambda = e^{-\frac{\tau_\lambda}{\cos\vartheta}},$$

$$\tau_\lambda = \int_{p_0}^p \alpha_\lambda \rho(p) dp,$$

где  $\tau_\lambda$  – оптическая толщина атмосферы;  $\alpha_\lambda$  – массовый коэффициент поглощения излучения с размерностью  $\text{м}^2/\text{кг}$ ;  $\rho(z)$  – плотность газа,  $\text{кг}/\text{м}^3$  поглощающее излучение. Измеряемое на спутнике восходящее тепловое излучение (радианс) обозначим  $J_\lambda^\uparrow(p_h)$ , где  $p_h$  – высота спутника.

Для расчета плотности поглощающего газа соотношение перепишем в следующем виде

$$J_{\lambda\text{рад}}^\uparrow(p_n) = B_\lambda[T(p_0)] \cdot e^{-\frac{\tau_\lambda}{\cos\vartheta}} - \frac{\alpha_\lambda}{\cos\vartheta} \int_{p_0}^0 B_\lambda[T(p)] e^{-\frac{\tau_\lambda}{\cos\vartheta}} \rho(p) dp,$$

где  $J_{\lambda\text{рад}}^\uparrow(p_n)$  – интенсивность излучения, измеряемого на платформе спутника с высоты  $p_n$ .

Если разбить на элементарные участки  $\Delta p$  высоту с учетом малого значения оптической толщины атмосферы и угла зондирования близкого к

надиру, то можно получить систему приближенных уравнений для определения содержания газа  $\rho(p_i)$ , поглощающего излучение на высоте  $p_i$ , на разных длинах волн  $\lambda_j$

$$\sum_{i=1}^n (B_{\lambda_j}[T(p_i)]\Delta p + B_{\lambda_j}[T(p_0)]\rho(p_i)) = \frac{\cos\vartheta}{\alpha_{\lambda_j}} B_{\lambda_j}[T(p_0)] - J_{\lambda_j rad}^\uparrow(p_n).$$

Эта система уравнений позволяет определять плотность газа, поглощающего излучение.

На рис. 1 представлен график распределения углекислого газа по высоте по территории Казахстана. На нем отражается общее свойство  $\text{CO}_2$ , концентрация этого газа по высоте не меняется.

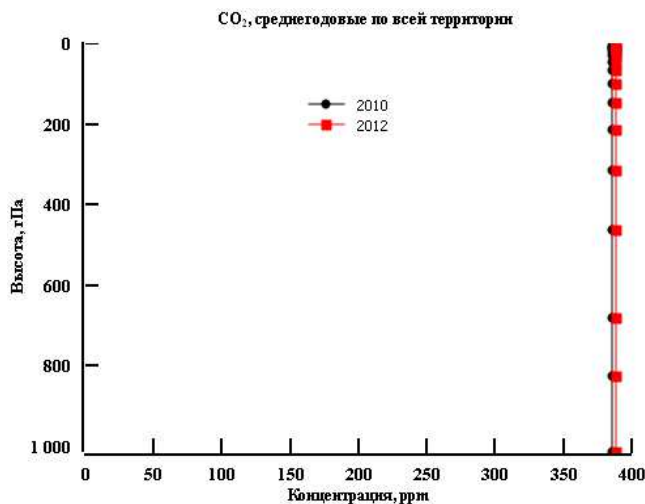


Рис. 1. Распределения углекислого газа по высоте на территории Казахстана.

С учетом этого свойства углекислого газа можно определить концентрацию газа по следующему соотношению:

$$\rho_{CO_2} = \frac{\cos\vartheta}{\alpha_\lambda} \frac{B_\lambda[T(p_0)] - J_{\lambda rad}^\uparrow(p_n)}{\sum_{i=1}^n (B_\lambda[T(p_i)]\Delta p + B_\lambda[T(p_0)]}$$

Многие параметры последнего соотношения могут быть получены в результате обработки спутниковых данных: температуры, давления, измеряемого на спутнике восходящего теплового излучения (радианс) с размерностью

$$\frac{вт}{м^2 \cdot МКМ_{cp}}$$

Для определения коэффициентов поглощения используется информационная система HITRAN. Она предназначена для обеспечения доступа к информации о параметрах спектральных линий атмосферных газов и загрязняющих веществ через интернет. Система состоит из стандартной

базы данных HITRAN [9] и GEISA [6], которая в основном охватывает относительно хорошо изученную инфракрасную область спектра, но распространяется на более широкие спектральные диапазоны от микроволн до ультрафиолета. База данных интернет-портала по молекулярной спектроскопии может содержать списки параметров спектральной линии из разных источников данных. В банке атмосферных данных NASA имеются распределения плотности газов и их содержания в атмосферном столбе, рассчитанные на основе различных моделей. Но пока они покрывают не всю территорию Земли, поэтому актуальной остается задача расчета плотности атмосферных газов, поглощающих тепловое излучение.

Поглощение атмосферными составляющими можно характеризовать с помощью спектральной зависимости коэффициентов молекулярного поглощения. Спектральный характер молекулярного поглощения, обусловленный сильной изменчивостью коэффициентов, является основанием для допущения селективного поглощения в первом приближении. Вычисление спектральных профилей линий молекул газа основано на линейном методе, который суммирует стандартные формы линий отдельных линий поглощения. Позиции линейного центра и интенсивности регистрируются спектрометрами высокого разрешения в контролируемых лабораторных условиях. Если присутствует некоторое количество атмосферных газов, то с учетом свойства их селективности (избирательности) коэффициент молекулярного поглощения выбранным газом можно записать

$$k_{\lambda} = \sum_n k_{\lambda n} ,$$

где индекс суммирования  $n$  – соответствует отдельным линиям поглощения. Таким образом, общий коэффициент молекулярного поглощения в атмосфере представляет собой, в первом приближении, сумму коэффициентов поглощения в отдельных линиях поглощения атмосферного газа. Значения коэффициента поглощения конкретного газа могут быть получены из базы данных HITRAN, которая содержит спектроскопические данные о молекулярном поглощении для 29 газов, из которых состоит основная часть атмосферного воздуха Земли. Всего газов в базе – 42. Данные, представленные в базе HITRAN, являются результатами экспериментов, позволяющие восстановить спектры поглощения и излучения. Количество линий поглощения и интервалы в волновых числах для  $\text{CO}_2$ , взятые из баз данных HITRAN и GEISA показано в таблице. Базы данных позволяют детально учесть каждую спектральную линию поглощения молекулами воздуха.  $\text{CO}_2$  имеет в ИК области спектра длинноволновую полосу погло-

щения, которая играет важную роль в радиационном режиме стратосферы и более высоких слоев атмосферы. Измерения уходящего излучения в обеих полосах используются для определения профиля температуры атмосферы (для термического зондирования атмосферы) из космоса.

Таблица

Данные линий поглощения углекислого газа

База	Интервал, см <sup>-1</sup>	Сумма линий
HITRAN-08	0...12785	314919
GEISA-11	5,89...12784	413524
HITRAN-12	0...12785	471847

Распределение содержания углекислого газа в атмосфере по территории Казахстана по данным сканера AIRS представлено на рис. 2, а его расчетный вариант на рис. 3. Основной максимум концентрации CO<sub>2</sub> приходится на западную часть Костанайской области (413,6 ppm) и локальный максимум на граничный участок востока Костанайской области и запад Акмолинской области (410,3 ppm). Внутригодовые средние содержания CO<sub>2</sub> и тренды их изменений по территории Казахстана показаны на рис. 4. На этих графиках наблюдается увеличение углекислого газа в теплое время года. Результаты статистического анализа изменений концентрации углекислого газа по территории Казахстана за период 2003...2016 гг. представлены на рис. 5. За исследуемый период среднее значение концентрации CO<sub>2</sub> выросло с 374 ppm до 403 ppm, минимальное с 370 ppm до 401 ppm, максимальное с 378 ppm до 404 ppm. В среднем по территории Казахстана в период 2003...2016 гг. концентрация углекислого газа увеличилась на 7,75 %.

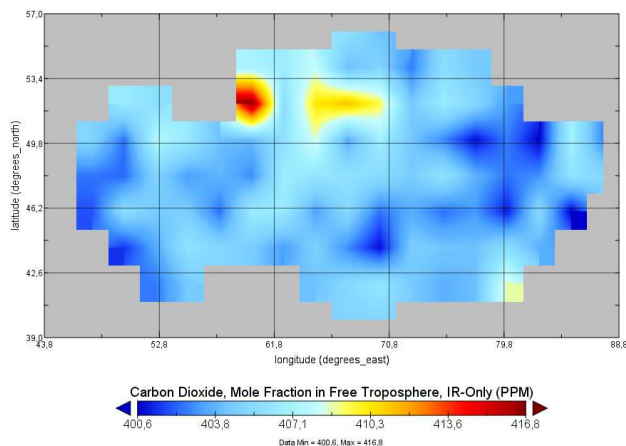


Рис. 2. Содержание углекислого газа в атмосфере по территории Казахстана (февраль 2017 г.) по данным сканера AIRS.

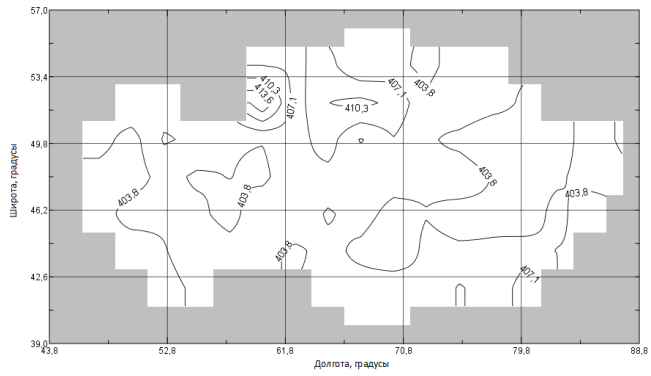


Рис. 3. Расчетное распределение углекислого газа (ppm) в атмосфере по территории Казахстана (февраль 2017 г.).

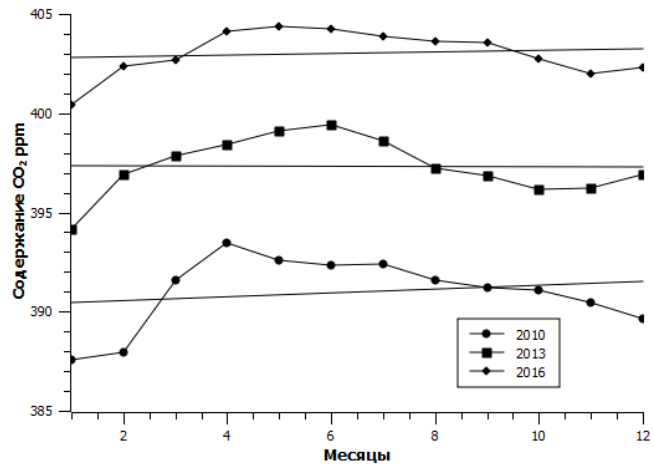


Рис. 4. Внутригодовые средние содержания  $CO_2$  и тренды их изменений по территории Казахстана.

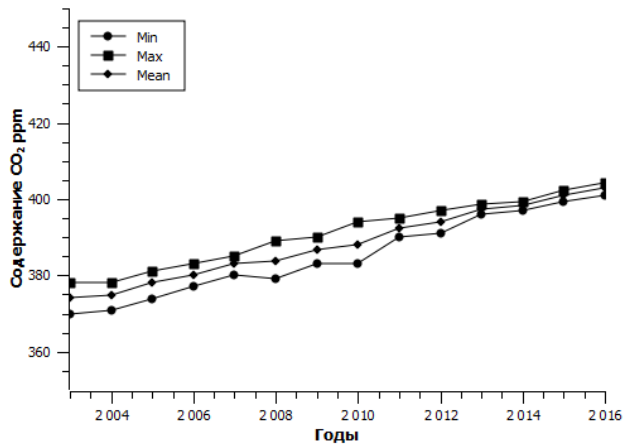


Рис. 5. Многолетние изменения содержания  $CO_2$  в атмосфере Казахстана за период 2002...2016 годы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кароль И.Л., Киселев А.А., Генихович Е.Л., Чичерин С.С. Сокращение выбросов короткоживущих атмосферных примесей как альтернативная стратегия замедления изменений климат // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2013. – Том 49. – №5. – С. 503-522.
2. Фил де Кола, Секретариат ВМО. Интегрированная глобальная информационная система по парниковым газам (ИГИСПГ) // Бюллетень ВМО. – 2017. – Том 66 (1) – С. 38-45.
3. Чеснокова Т.Ю., Ченцов А.В., Рокотян Н.В., Захаров В.И. Определение содержания парниковых газов из атмосферных спектров солнечного излучения с использованием различных спектроскопических данных по линиям поглощения // Оптика атмосферы и океана. – 2015. – №5. – С. 489-495.
4. Archer D. Fate of fossil fuel CO<sub>2</sub> in geologic time // J. Geophys. Res. – 2005. – 110.
5. Gerlach T.M. Present-day CO<sub>2</sub> emissions from volcanoes: Eos, Transactions // American Geophysical Union. – 1991. – Vol. 72. – № 23. – P. 249-255.
6. Jacquinet-Husson N. et al., Издание 2009 г. Спектроскопической базы данных GEISA // J. Quant. Спектроскопия. Radiat. Перевод, 112, 2395-2445 (2011).
7. Koshkarova V.L. and Koshkarov A.D. Regional signatures of changing landscape and climate of northern central Siberia in the Holocene // Russian Geology and Geophysics. – 2004. – №45 (6). – P. 672-685.
8. Petty G.W. First Course in Atmospheric Radiation – Sundog Publishing, 2004. – P. 229-251.
9. Rothman L.S. et al. The HITRAN 2012 Molecular Spectroscopic Database // J. Quant. Спектроскопия. Radiat. Перевод. 130, 4-50 (2013) (doi: 10.1016 / j. jqsrt. 2013.07.002).
10. Smith H.J., Wahlen M and Mastroianni D. The CO<sub>2</sub> concentration of air trapped in GISP2 ice from the Last Glacial Holocene transition. // Geophysical Research Letters. – 1997. – 24 (1). P. 1-4.
11. Wagner, Friederike; Bent Aaby and Henk Visscher. Rapid atmospheric O<sub>2</sub> changes associated with the 8,200-years-B.P. cooling event. – 2002. – PNAS 99 (19). – P. 12011-12014.

Поступила 21.05.2018

Техн. ғылымд. докторы	А.Х. Ахмеджанов
Техн. ғылымд. канд.	Т.К. Караданов
Физ.-мат. ғылымд. канд.	Н.Д. Ахметов



## **БӨЛУ КӨМІРҚЫШҚЫЛ ГАЗДЫ ҚАЗАҚСТАН АУМАҒЫНДА НЕГІЗІНДЕ СПУТНИКТІК ДЕРЕКТЕРІ**

*Түйінді сөздер:* атмосфера, көмірқышқыл газы концентрациясы, тік профильді, спутник, қашықта өлшеу

*Атмосферада көмірқышқыл газының бөлу деректері бойынша ғарыштық зондау Қазақстан аумағында қаралды. Статистикалық талдау өзгерістер көмірқышқыл газының шоғырлануының Қазақстан аумағында кезеңде 2003 жылдан бастап – 2016 жылға дейін алынған нәтижелер. Қазақстан аумағы бойынша 2003 жылдан бастап 2016 жылға дейін көмір қышқыл газының концентрациясы 7,75 пайызға көбейді.*

Akhmedzhanov A.Kh., Karadanov T.K., Akhmetov N.D.

## **THE DISTRIBUTION OF CARBON DIOXIDE OF THE TERRITORY OF REPUBLIC OF KAZAKHSTAN BASED REMOTE SENSING DATA**

*Keywords:* atmosphere, carbon dioxide, concentration, vertical profile, satellite, remote sensing

*The distribution of carbon dioxide in the atmosphere based on remote sensing data on the territory of Kazakhstan is considered. The results of statistical analysis of changes in the concentration of carbon dioxide in the territory of Kazakhstan for the period 2003...2016 years are calculated. The average for the territory of Kazakhstan from 2003 to 2016 the concentration of carbon dioxide has increased by 7,75 %.*