

**Р.М. Акименко, В.Н. Арефьев, Л.Л. Брижанская, Н.Е. Каменоградский,
Ф.В. Кашин, Л.И. Сорокина, Л.А. Спекторов**

ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В АТМОСФЕРЕ

Представлены результаты непрерывных восьмилетних (1980–1987 гг.) измерений вариаций средней по высоте относительной концентрации углекислого газа (CO_2) в вертикальном столбе атмосферы спектроскопическим методом, проводимых на северном побережье оз. Иссык–Куль. Приводятся также данные о вертикальном распределении концентрации CO_2 в том же районе по результатам измерений оптико-акустическим газоанализатором в пробах воздуха, отобранных на разных высотах с борта самолета в разные сезоны в 1982–1985 гг. Результаты измерений средней по высоте концентрации CO_2 двумя независимыми методами (наземным интегральным спектроскопическим и самолетным локальным в пробах воздуха) хорошо согласуются между собой.

Необходимость контроля и изучения изменчивости углекислого газа (CO_2) в атмосфере стала очевидной после надежно установленного экспериментального факта постоянного увеличения концентрации атмосферного CO_2 [1]. Систематические наблюдения за изменением атмосферного CO_2 проводятся на сети станций мониторинга фоновое загрязнения атмосферы (БАПМон) Всемирной метеорологической организации (ВМО). В этих и других исследованиях, использующих измерения концентрации в пробах воздуха оптико-акустическими газоанализаторами и газовыми хроматографами (локальный метод) выявлены основные пространственно-временные особенности CO_2 в атмосфере [2]. Локальный метод наиболее эффективен в фоновых условиях и поэтому большинство станций сети БАПМон (ВМО) расположены в океанических и близких к ним районах. Между тем данные об изменчивости углекислого газа в атмосфере над континентами, где сосредоточены основные источники и стоки CO_2 , представляют не меньший научный интерес. В настоящее время таких данных получено мало.

Результаты систематических измерений изменчивости концентрации CO_2 в атмосфере в континентальных условиях спектроскопическим методом представлены в [3–5]. Спектроскопический метод использует молекулярное поглощение излучения и основывается на информации о содержании поглощающего газа в спектрах прошедшей через атмосферу солнечной радиации. Количество исследуемого газа пропорционально функции пропускания, определяемой экспериментально по регистрируемой интенсивности солнечного излучения в спектральном диапазоне, включающем полосу поглощения. В частности, для исследования углекислого газа в атмосфере используется колебательно-вращательная полоса поглощения $4\nu_2 + \nu_3$ с центром 2,06 мкм. Количественная связь между содержанием углекислого газа и функцией пропускания задается градуировочной зависимостью, рассчитанной по модели спектра, спектроскопическим параметрам колебательно-вращательных линий, формирующих спектр поглощения, и атмосферной стратификации, соответствующей времени измерений. Наиболее полная и широко используемая сводка спектроскопических параметров линий поглощения атмосферных газов [6] и разработанные процедуры расчета позволяют получить результаты с погрешностью 6–10%. Она вполне удовлетворительна при решении многих задач атмосферной оптики, но слишком велика для измерения изменчивости углекислого газа в атмосфере. Например, по данным измерений локальным методом, на станциях мониторинга CO_2 , сезонные вариации приземных значений концентрации не превышают 5%, а межгодовая изменчивость – 1%. Поэтому для измерения углекислого газа точность спектроскопического метода должна быть существенно выше точности типичных измерений в атмосфере. Повышение точности спектроскопических измерений концентрации CO_2 требует специальной калибровки метода, исследований зависимости функции пропускания от концентрации CO_2 при контролируемых условиях и сравнения экспериментальных результатов с соответствующими расчетными. Надежность калибровки обеспечивается созданием протяженных оптических трасс, поэтому аппаратный комплекс для лабораторных исследований состоял из оптической многоходовой кюветы [7] с базой 50 м и спектрометра [8] среднего разрешения. Геометрическая длина пути в экспериментах составляла 1–2,6 км. Так как спектральная область 2,06 мкм, включающая полосу поглощения углекислого газа, перекрыта отдельными линиями колебательно-вращательных полос водяного пара $3\nu_2$, $\nu_1 + \nu_2$, $\nu_2 + \nu_3$, то исследования функции пропускания проведены на модельных атмосферах, состоящих не только из CO_2 – N_2 , но и H_2O – N_2 , CO_2 – H_2O – N_2 . Условия экспериментов: содержание поглощающих газов, температура, общее давление – варьировались в широких пределах и были близки к атмосферным.

Лабораторные исследования позволили провести коррекцию расчета градуировки. И если по результатам опытов с модельной атмосферой CO_2 – N_2 удалось согласовать экспериментальные и расчетные функции пропускания путем использования поправочного множителя в интегральной интенсивности полосы поглощения углекислого газа [9], то эксперименты с модельной атмосферой H_2O –

N_2 показали необходимость изменить интенсивность лишь отдельных линий поглощения водяного пара [10], что привело к хорошему согласию измеренных и рассчитанных спектров. Суммарное влияние учета этих поправок на функцию пропускания было выверено с помощью результатов экспериментов на модельной атмосфере $CO_2-H_2O-N_2$ [10] и соответствующих им расчетов. Существенным моментом в практической реализации спектроскопического метода является выбор места измерений. Непрерывность ряда данных определяется числом солнечных дней, распределенных равномерно в течение года. Сравнительный анализ [11] позволил установить наиболее благоприятные географические районы для проведения такого рода измерений, к которым, в частности, относится район оз. Иссык-Куль. Расчетный градуировочный график «функция пропускания — содержание углекислого газа» зависит от вертикальных распределений температуры, давления, влажности и концентрации CO_2 . Использование данных аэрологического зондирования позволяет наиболее точно учесть атмосферную стратификацию. В этом случае для каждого дня измерений необходим расчет как минимум одной градуировки, что усложняет оперативную обработку экспериментальных результатов во время длительных систематических наблюдений. Более оптимальным является применение средних за месяц профилей температуры, давления и влажности, характерных для места измерений. Выбор вертикального профиля концентрации CO_2 основан на результатах исследований распределения углекислого газа по высоте, проведенных в августе 1982, октябре 1983, июле 1984, январе и апреле 1985 г. [12]. Отбор проб воздуха на высотах до 6 км осуществлялся с борта самолета, а анализ был проведен на оптико-акустическом газоанализаторе [13]. Средние значения концентрации CO_2 на соответствующих высотах для каждого отдельного цикла измерений представлены на рис. 1. Из этих данных видно, что наиболее значительные вертикальные градиенты наблюдаются в нижнем 200-метровом слое и являются, по-видимому, местной особенностью. Выше 2 км вертикальные градиенты незначительны. В целом представленные результаты позволяют считать, что углекислый газ равномерно перемешан по высоте и можно полагать концентрацию CO_2 постоянной.

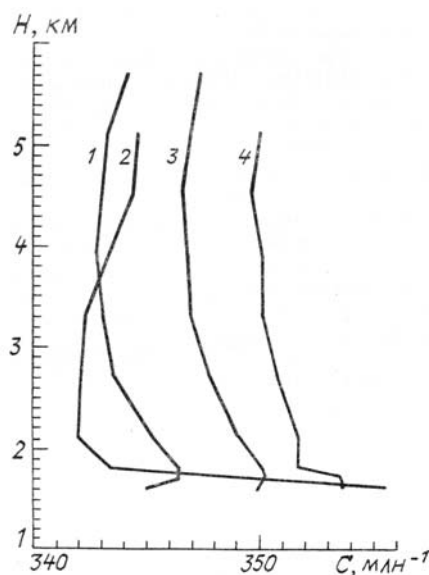


Рис. 1. Вертикальное распределение углекислого газа в атмосфере над оз. Иссык-Куль: 1 — октябрь, 2 — июль, 3 — январь, 4 — апрель

Систематические измерения содержания углекислого газа были начаты в мае 1980 г. и продолжаются в настоящее время. До января 1988 г. зарегистрировано примерно 40 тысяч спектрограмм за более чем 1200 дней измерений. Средние за месяц концентрации CO_2 по декабрь 1987 г. включительно приведены на рис. 2. Здесь же приведены данные о концентрации CO_2 , полученные по самолетным зондировкам. Хорошее согласие измерений двумя независимыми методами говорит о достаточной надежности калибровки спектроскопического метода по результатам лабораторных исследований и правильности методики, примененной в расчете градуировки. Полученные данные с учетом зависимости амплитуды и фазы сезонных вариаций углекислого газа от географической широты места измерений согласуются с результатами сети станции БАПМон (ВМО). Выявлены характерные для CO_2 сезонные изменения концентрации, определяемые сезонным изменением обмена между биосферой и атмосферой. Максимум концентрации CO_2 приходится на апрель — май, минимум на август — октябрь. Многочисленные спектроскопические измерения подтверждают увеличение концентрации углекислого газа. Отметим некоторые различия данных спектроскопических измерений для континентальных условий в фоновых, полученных локальным методом с учетом различия в широте.

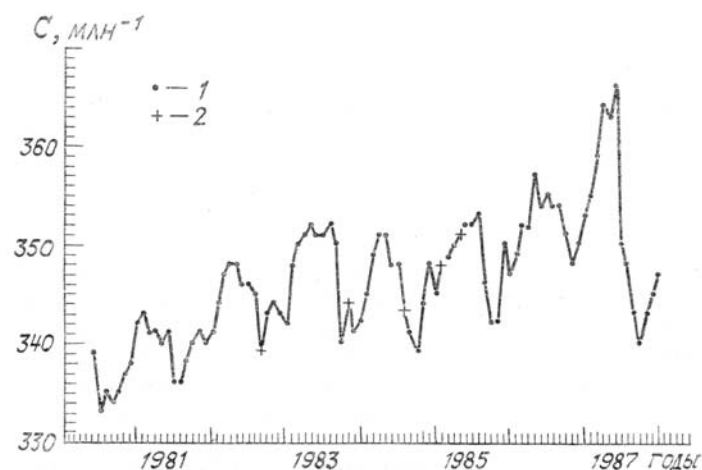


Рис. 2. Результаты измерений концентрации углекислого газа в атмосфере в районе оз. ИссыкКуль: 1 — среднемесячные спектроскопические измерения, 2 — значения концентрации CO_2 по данным самолетного зондирования

На рис. 3 приведены скользящие средние за двенадцать месяцев, рассчитанные по нашим измерениям и по данным обсерватории Мауна-Лоа (Гавайские острова) [14]. Если в 1980, 1981 и 1984 гг. результаты тех и других измерений соответствуют друг другу, то в остальное время видно превышение спектроскопических данных, выходящее за пределы погрешности последних. Несмотря на то, что спектроскопическим методом измеряется полное содержание углекислого газа в столбе атмосферы, а локальным — в пробах воздуха, отмеченное различие может быть отнесено за счет изменения процесса обмена в континентальных условиях между атмосферой и биосферой.

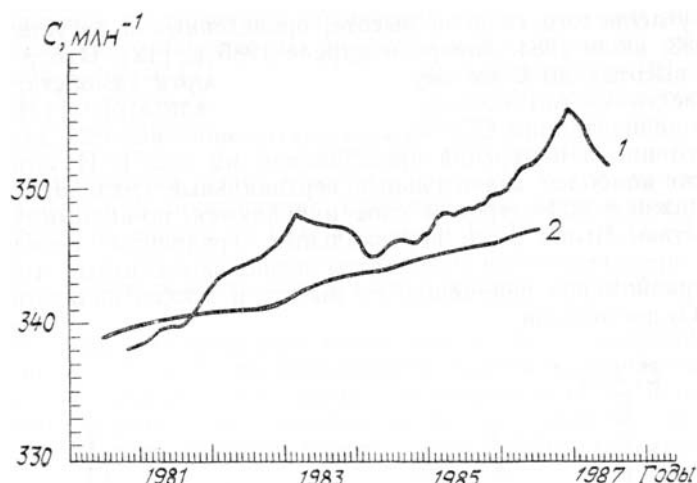


Рис. 3. Скользящие средние за двенадцать месяцев: 1 — спектроскопические измерения, 2 — локальные измерения [14]

1. Pales J.C., Keeling C.D. // J. Geophys. Res. 1965. V. 70. № 24. P. 6053.
2. Каменоградский П.Е., Пашков А.А. // Труды ИЭМ. Л.: Гидрометеоздат. 1981. Вып. 10(84). С. 73.
3. Броунштейн А.М., Парамонова Н.Н., Фролов А.Д., Шашков А.А. // Труды ГГО им. А.И. Воейкова. Л.: Гидрометеоздат. 1976. Вып. 369. С. 5.
4. Акименко Р.М., Баранова Е.Л., Каменоградский Н.Е., Кашин Ф.В., Мухометшина Л.А., Сорокина Л.И., Спекторов Л.А. // Труды ИЭМ. М.: Гидрометеоздат. 1987. Вып. 19(125). С. 54.
5. Пугачев Н.С., Дианов-Клоков В.П., Доронина Т.Н. // Изв. АН СССР. ФАО. 1985. Т. 21. № 7. с. 484.
6. Rothman L.S. // Appl. Optics. 1981. V. 20. № 5. P. 791.
7. Арефьев В.Н., Волковицкий О.А., Гончаров Н.В., Дианов-Клоков В.И. // ПТЭ. 1974. № 1. С. 198.
8. Арефьев В.П., Дианов-Клоков В.П., Малков И.Л. // Труды ПЭМ. М.: Гидрометеоздат. 1978. Вып. 8(81). С. 73.
9. Арефьев В.П., Каменоградский Н.Е., Кашин Ф.В., Мухометшина Л.А. // Труды ИЭМ. М.: Гидрометеоздат. 1987. Вып. 19(125). С. 48.

10. Акименко Р.М., Арефьев В.Н., Каменоградский Н.Е., Кашин Ф.В., Пророк Л.А., Устинов В.П. //Труды ИЭМ. М.: Гидрометеоиздат. 1988. Вып. 49(139). С. 107.
11. Каменоградский Н.Е., Мусаева С.С., Цвєрава В.Г. //Труды ИЭМ. М.: Гидрометеоиздат. 1982. Вып. 12(96). С. 8.
12. Казакова К.В., Каменоградский Н.Е., Кашин Ф.В., Погадаев Б.Н., Фабер Е.В. //Труды ИЭМ. М.: Гидрометеоиздат. 1987. Вып. 19(125). С. 58.
13. Броунштейн А.М., Фабер Е.В., Шашков А.А. //Труды ГГО им. А.И. Воейкова. Л.: Гидрометеоиздат. 1984. Вып. 472. С. 11.
14. Schell R. C. (Ed.) Geophysical Monitoring for Climatic Change: №5—Summary Report 1986. U. S. Dept. of Commerce, NOAA, Environmental Research Laboratories, Boulder, Colorado. 1987. 155 p.

Институт экспериментальной метеорологии,
НПО «Тайфун», Киргизский госуниверситет

Поступила в редакцию
31 мая 1988 г.

R. M. Akimenko, V. N. Arefiev, L. L. Brizhanskaya, N. E. Kamenogradsky, F. V. Kashin, L. I. Sorokina, L. A. Spectorov. **Study of Atmospheric Carbon Dioxide.**

The results of the long-term (1980–1987) continuous spectroscopic measurements on the vertical profiles of the mean CO₂ concentration over the north coast of Lake Issyk-Kul (Kirghizia) are reported. Also presented are the altitude distributions of the CO₂ concentration monitored by an airborne opto-acoustic gas analyzer in air samples collected at different heights and in different seasons from 1982 through 1985. The data obtained from ground-based integrated spectroscopic observations and airborne in situ measurements are in good agreement.