

А.Н. Рублев¹, М. Бухвиц², Т.Б. Журавлева³

Сопоставление спутниковых и самолетных измерений концентраций углекислого газа над Западной Сибирью

¹ *Институт молекулярной физики,*

Российский научный центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

² *Институт дистанционного зондирования, Университет г. Бремена, Германия*

³ *Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск, Россия*

Поступила в редакцию 27.01.2006 г.

Восстановление средней по высоте концентрации углекислого газа выполнено с помощью разработанного в Университете г. Бремена WFM-DOAS алгоритма на основе данных спектрометра SCIAMACHY, который установлен на борту исследовательского спутника «Envisat». Приведено сравнение полученных данных с результатами самолетных измерений для двух районов Западной Сибири (гг. Сургут и Новосибирск, 2003 г.). Восстановленный временной ход концентрации CO₂ качественно хорошо совпадает с данными самолетного зондирования в теплый период года и сильно занижен при наличии снежного покрова. Обсуждаются возможности улучшения точности WFM-DOAS алгоритма.

Введение

С начала индустриального развития объемная концентрация углекислого газа в атмосфере увеличилась приблизительно с 280 до 380 млн⁻¹. В связи с влиянием CO₂ на климат существует необходимость контроля его содержания в масштабах всей планеты. В марте 2002 г. Европейским космическим агентством (ESA) был запущен исследовательский спутник «Envisat» с установленным на борту спектрометром SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography) [1, 2]. Одним из назначений этого прибора является определение средней по высоте концентрации углекислого газа в атмосфере (XCO₂). Это новая область космического мониторинга, и пока еще трудно говорить о надежности подобных измерений. Изменчивость XCO₂ мала. Например, по данным [3] амплитуда колебания XCO₂ относительно тренда в течение года равна 7–10 млн⁻¹ в зависимости от географического района и сопоставима с ошибками измерений SCIAMACHY [4].

Разработка и отладка методик определения концентрации CO₂ по спутниковым измерениям требуют большого количества опорных данных относительно временной и пространственной изменчивости концентраций углекислого газа в атмосфере Земли. До недавнего времени источником этих данных являлись результаты расчетов по моделям глобального кругооборота углерода [5, 6], которые, в свою очередь, пока далеки от совершенства. Так, согласно результатам моделирования из 6–7 млрд т (Гт) углерода, ежегодно поступающего в атмосферу с CO₂ в результате антропогенной деятельности, 3 Гт углерода остается в атмосфере, 2 Гт поглощается океаном, а «судьба» разности (1–2 Гт) остается неизвестной.

Существует определенная опасность, что настройка спутниковых алгоритмов определения содержания CO₂ в атмосфере только по расчетным данным приведет к порочному кругу, когда ошибки моделей вызовут согласованные ошибки в интерпретации спутниковых данных, а это, в свою очередь, затруднит совершенствование самих углеродных моделей. Особенно актуально это обстоятельство для зоны северных широт, где согласно [5] и происходит модельный недоучет поглощения упомянутых выше 1–2 Гт углерода бореальными лесами.

В связи с этим большую ценность представляют новые независимые результаты самолетных измерений концентраций CO₂, полученные над Западной Сибирью [7–9], которые могут быть использованы для разработки и тестирования спутниковых алгоритмов. Полеты проводились в течение года над гг. Сургут и Новосибирск один раз в месяц, пробоотбор атмосферного воздуха осуществлялся на 8 высотах в диапазоне от 0,5 до 7 км.

При отладке спутниковых алгоритмов восстановления XCO₂ в различных условиях чрезвычайно полезной является информация о состоянии облачности и снежного покрова в рассматриваемом географическом районе. Эти данные могут быть получены из архива наземных наблюдений на станциях Российской метеорологической службы, размещенного на открытом для пользователей сервере «Погода России» [10].

В настоящей статье дается краткое описание алгоритма, используемого для восстановления XCO₂ по данным SCIAMACHY. Приведены первые результаты его применения для районов Сургута и Новосибирска (2003 г.), для которых имеются данные самолетных измерений [7–9].

1. Спутниковый спектрометр SCIAMACHY

Спектрометр SCIAMACHY [1, 2] установлен на борту спутника «Envisat». Спутник имеет полярную солнечно-синхронную орбиту со средней высотой над поверхностью Земли около 800 км. Орбита спутника пересекает экватор в утренние часы в 10:00 по местному времени. Угол наклона орбиты к плоскости экватора составляет 98,6°; полный обзор поверхности Земли обеспечивается за 6 дней. Западные районы Сибири попадают в зону действия спутника примерно в одно и то же время – между 11:30 и 11:50 по местному солнечному времени. Горизонтальное разрешение при измерениях в надир зависит от положения орбиты и спектрального канала. В среднем оно составляет 60 км поперек и 30 км вдоль следа трассы спутника на земной поверхности.

SCIAMACHY является дифракционным спектрометром. Он последовательно осуществляет надирные и лимбовые измерения спектров отраженного и рассеянного излучения Солнца в диапазоне 240–2400 нм. Прибор также измеряет спектральную прозрачность атмосферы при появлениях Солнца или Луны над земным горизонтом. Спектральный интервал SCIAMACHY разделен на 8 каналов, характеристики которых приведены в табл. 1, взятой из [11].

Таблица 1

Характеристики каналов спектрометра SCIAMACHY [11]

Номер канала	Границы спектральных каналов, нм	Спектральное разрешение, нм	Материал детектора	Температура детектора, К
1 (UV)	240–314	0,24	Si	200
2 (UV)	309–405	0,26	Si	200
3 (Vis)	394–620	0,44	Si	235
4 (Vis)	604–805	0,48	Si	235
5 (IR)	785–1050	0,54	Si	235
6 (IR)	1000–1750	1,48	InGaAs	200
7 (IR)	1940–2040	0,22	InGaAs	150
8 (IR)	2265–2380	0,26	InGaAs	150

Содержание CO₂ в вертикальном столбе атмосферы восстанавливается по измерениям в надир восходящей солнечной радиации, полученным в 6-м канале спектрометра. Этот диапазон содержит полосу поглощения CO₂ с центром 1600 нм, которая является относительно свободной от «мешающих» газов (главным образом, водяного пара). Одновременно по измерениям в 4-м канале восстанавливается содержание кислорода O₂ (А-полоса с центром 760 нм). Это позволяет вычислить XCO₂ для столба сухого воздуха по формуле

$$XCO_2 = LCO_2 / LO_2 / w_{O_2},$$

где LCO₂ и LO₂ – содержание CO₂ и O₂ в столбе атмосферы; w_{O₂} = 0,2095 – относительная доля кислорода в сухом воздухе.

2. Алгоритм восстановления WFM-DOAS

Для восстановления содержания малых газовых составляющих (в том числе и CO₂) по данным спектрометра SCIAMACHY в университете г. Бремена (Германия) был разработан специальный алгоритм WFM-DOAS (Weighting Function Modified Differential Optical Absorption Spectroscopy) [4, 12]. Он основан на минимизации невязки логарифмов рассчитанных I_{mod} и измеренных I_{obs} яркостей, нормированных по внеатмосферному солнечному спектру. Минимизация осуществляется методом наименьших квадратов на основе следующего функционала:

$$\sum_{i=1}^n [I_{\text{mod}}^i(V) - I_{\text{obs}}^i + P^i(a_m)]^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $i = 1, \dots, n$ – номера спектральных каналов; V – содержание всех атмосферных газов (включая CO₂), поглощенных столбом атмосферы в выбранном канале; $P^i(a_m)$ – подгоночный полином по I_{obs}^i с постоянными коэффициентами a_m , $m = 1 \div 3$.

Для эффективных расчетов $I_{\text{mod}}^i(V)$ и определения содержания CO₂ по формуле (1) была реализована быстрая интерполяционная схема, основанная на использовании опорных значений величины $I_{\text{mod}}^i(V)$ для заданных значений оптических параметров атмосферы. Более подробно детали используемой в настоящее время версии алгоритма восстановления WFM-DOAS представлены в [4, 12, 13]. Заметим, что определенная из (1) минимальная ошибка невязки (Root-Mean-Square error (RMS)) используется в дальнейшем как индикатор качества оценки XCO₂.

Авторы алгоритма WFM-DOAS акцентировали внимание на двух важных аспектах его применения [4].

Во-первых, в процессе восстановления концентрации CO₂ необходимо (насколько это возможно) отсортировать пиксели, содержащие облачность. С этой целью был разработан специальный пороговый алгоритм, описанный в [4]. Он основан на измерении отражательной способности атмосферы (нормированной интенсивности уходящего излучения) с помощью специального вспомогательного прибора PMD (Polarisation Measurement Device), входящего в SCIAMACHY. Пространственное разрешение PMD почти в 10 раз лучше пространственного разрешения самого SCIAMACHY, спектральный диапазон первого канала PMD-1 – 320–380 нм. Если полученная на основе измерений PMD отражательная способность выше предопределенного заранее порогового значения для любого подпикселя, то соответствующий ему пиксель SCIAMACHY классифицируется как облачный.

Во-вторых, в действующей версии алгоритма WFM-DOAS восстановления XCO₂ для устранения очевидных отклонений в оценках LCO₂ и LO₂ используются масштабирующие множители, не зависящие от времени и места измерений. В связи с этим

в [4] предлагается пока использовать результаты измерений SCIAMACHY по CO₂ только с целью анализа его пространственно-временной изменчивости, не привязываясь к абсолютным значениям оценок LCO₂ или XCO₂.

3. Результаты определения концентрации CO₂ над Сургутом и Новосибирском

При сопоставлении с данными самолетных наблюдений [7–9] использовались результаты восстановления XCO₂ на основе измерений SCIAMACHY с апреля по октябрь 2003 г. Чтобы увеличить статистическую обеспеченность, размеры территорий, для которых выполнялся анализ спутниковых данных, были расширены по сравнению с районами полетов. Пиксели отбирались на площадях, ограниченных окружностями с радиусом 1000 км и центрами в Сургуте (61°24' с.ш., 73°29' в.д.) и Новосибирске (точнее, на правом берегу южной части Обского водохранилища – примерно 54° с.ш., 82° в.д.).

Для устранения грубых ошибок, возникающих из-за сбоев аппаратуры или некорректной работы алгоритма восстановления XCO₂, использовалась предварительная селекция, включающая в себя одновременное выполнение нескольких односторонних или двусторонних пороговых критериев. Средние дневные значения MCO₂ концентраций углекислого газа для каждого района определялись как

$$MCO_2 = \sum_k (XCO_2)_k P_k / \sum_k P_k, \quad (2)$$

где k – порядковый номер пикселя, попавшего в рассматриваемый район; P_k – признак селекции, принимающий значение 1, если оценка XCO₂ удовлетворяет $N = 8$ при заданных критериях, и 0 – если хотя бы один из этих критериев нарушен, т.е. $P_k = \prod_{i=1}^N P_k^i$.

Названия критериев и соответствующие пороговые величины приведены в табл. 2.

Для односторонних критериев указано только одно значение. В табл. 2 даны также вероятности выполнения условий отдельных критериев и их совокупности, рассчитанные по наблюдениям над Новосибирском (левое верхнее число) и Сургутом (правое нижнее) отдельно для всех пикселей и пикселей, которые были определены как безоблачные по измерениям PMD.

Количество пикселей, которое было проанализировано при пролете спутника «Envisat» над районами Новосибирска и Сургута в 2003 г., составило примерно 80 000 и 100 000 соответственно. Оценки средних дневных концентраций углекислого газа MCO₂ для каждого пролета спутника над районами представлены на рис. 1. Квадратами отмечены значения MCO₂, рассчитанные по всем пикселям, прошедшим селекцию независимо от значения признака облачности, кружками – только по безоблачным пикселям. Жирные кривые построены по результатам интегрирования вертикальных профилей самолетных измерений XCO₂ [7, 8] с учетом экспоненциального убывания атмосферного давления с высотой. Для Сургута значения были получены по измерениям 1996 г. и пересчитаны на 2003 г. по среднему годовому ходу концентрации [7].

Аналогичный пересчет был сделан и для Новосибирска с учетом того, что в [8] представлены профили, усредненные за 1997–2004 гг.

Пунктирными линиями отмечены дни схода и появления снежного покрова. Эти дни определялись по измерениям глубины снежного покрова на метеостанциях, расположенных в центрах рассматриваемых районов [10]. Анализируемые пиксели SCIAMACHY могут лежать как севернее, так и южнее этих точек на удалении до 1000 км, поэтому отмеченные сроки для конкретных пикселей могут отличаться от фактических примерно на неделю.

Таблица 2

Характеристики критериев при определении средних дневных концентраций MCO₂

Номер критерия	Проверяемый параметр	Размерность (признак)	Пороги		Вероятность выполнения критериев				
			Нижняя граница	Верхняя граница	По всем пикселям	Только по безоблачным пикселям	Результирующая (по всем пикселям)		
1	Рабочее направление сканирования	признак		1,5	0,80	0,80	0,84	0,80	0,80
2	RMS невязок по спектру	отн. ед.		0,007	0,86	0,79	0,98	0,85	0,68
3	LO ₂	отн. ед.	0,50	1,02	0,83	0,77	0,85	0,74	0,59
4	Расчетная ошибка LO ₂	%		2	0,76	0,79	0,96	0,98	0,47
5	LCO ₂	отн. ед.	0,50	1,08	0,78	0,75	1,00	0,93	0,45
6	Диапазон XCO ₂	млн ⁻¹	340	400	0,48	0,42	0,83	0,73	0,28
7	Расчетная ошибка LCO ₂	%		8	0,50	0,55	0,90	0,93	0,22
8	Отсутствие облачности	признак		0,5	0,30	0,26	1,00	1,00	0,16
									0,11

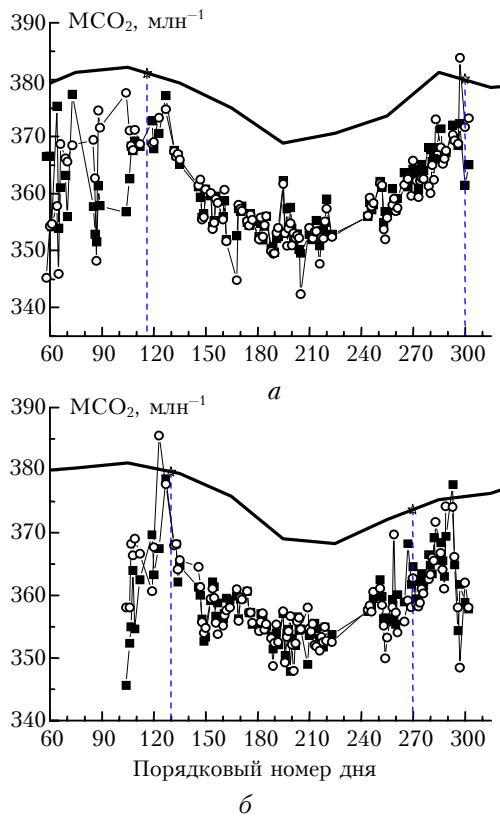


Рис. 1. Сопоставление концентраций углекислого газа, восстановленных по данным спутниковых и самолетных измерений, в районе Новосибирска (а) и Сургута (б). 2003 г.

Анализируя полученные результаты по концентрациям CO_2 с учетом приведенных выше двух замечаний авторов алгоритма [4], отметим, что в отсутствие снега результаты восстановления MCO_2 по данным SCIAMACHY качественно согласуются с самолетными измерениями. Для теплого времени года изменения MCO_2 по месяцам имеют почти симметричный характер с минимумом в конце июля. Максимальный диапазон изменчивости MCO_2 по данным SCIAMACHY для обоих районов составляет 12–14 млн^{-1} . Для самолетных измерений этот диапазон равен 11–13 млн^{-1} , т.е. практически совпадает со спутниковыми оценками. Абсолютное занижение спутниковых данных MCO_2 по сравнению с самолетными измерениями оказалось одинаковым как для Новосибирска, так и для Сургута, — например, в июле около 17 млн^{-1} . Это подтверждает вывод [4], что только изменением величины масштабирующих коэффициентов можно добиться соответствия спутниковых и фактических (в данном случае, самолетных) данных.

При наличии снежного покрова, когда значения зенитного угла Солнца также возрастают, работоспособность алгоритма WFM-DOAS нарушается. Значения концентраций MCO_2 уменьшаются по сравнению с концентрациями в соседние месяцы, когда снега уже или еще нет. По-видимому, ошибки в определении концентрации CO_2 , вызванные наличием снежного покрова, связаны со значительными отличиями спектрального хода альбедо A снега (рис. 2)

от нейтрального значения альбедо подстилающей поверхности $A = 0,1$, который используется в алгоритме WFM-DOAS [4] при получении опорной базы данных.

В частности, в полосе поглощения кислорода (760 нм) A снега может достигать 0,6–0,8, а в полосе поглощения CO_2 (1600 нм) $A \approx 0,03–0,06$ [14, 15]. Отметим, что отличие спектрального хода альбедо подстилающей поверхности от нейтрального наблюдается, хотя и в меньшей степени, для растительности (рис. 2, хвойный лес).

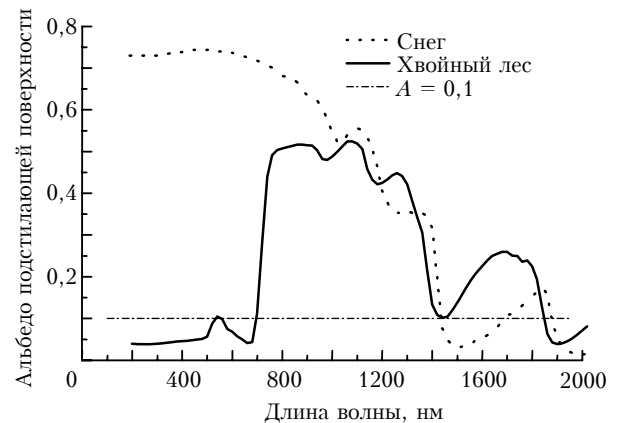


Рис. 2. Спектральное альbedo различных типов подстилающей поверхности (по данным [14, 15])

Из анализа результатов следует, что на возможности восстановления концентрации CO_2 снег влияет в значительно большей степени, чем облачность, так как оценки MCO_2 , полученные с учетом и без учета селекции пикселей по облачности, практически мало отличаются друг от друга для обоих рассматриваемых районов. Более изрезанный характер кривых MCO_2 на рис. 1 для безоблачных пикселей может быть объяснен, по-видимому, меньшим объемом статистических данных, используемых при усреднении: как следует из табл. 2, количество безоблачных пикселей в 3–4 раза меньше количества пикселей, прошедших остальные этапы селекции.

Вопреки предупреждению авторов работы [4], относительно слабое влияние облаков на MCO_2 обусловлено сильной взаимосвязью оценок LO_2 и CO_2 , коэффициенты корреляции R которых для двух районов лежат в пределах $0,92 \div 0,96$. Однако и после исключения облачных (по измерениям PMD) пикселей корреляция понижается несильно: $R = 0,82 \div 0,86$. Такие высокие значения R свидетельствуют о том, что существующая селекция пропускает большое количество облачных пикселей, потому что в условиях равнинной местности только отражение от верхней границы облаков вызывает примерно одинаковое относительное уменьшение длин рассеивающих трасс в двух различных оптически независимых участках спектра.

Косвенно (расстояние между метеостанцией и спутниковым пикселем может достигать несколько сотен километров) завышение количества безоблачных

пикселей подтверждают и данные наземных визуальных наблюдений за состоянием небосвода [10]. Подобные наблюдения проводятся несколько раз в сутки. Ближайший срок наблюдения, менее чем на 1 ч отличающийся от времени пролета спутника «Envisat», – 11 ч по местному солнечному времени. В подавляющем большинстве случаев в это время наблюдатели отмечали наличие облачности. Например, из 106 дней с апреля по октябрь 2003 г., когда орбита спутника проходила над Сургутом, на всех 9 метеостанциях, данные которых использовались для независимого контроля облачности в районе самолетных полетов, безоблачное небо отмечалось только 36 раз во всех 954 наблюдениях. Отметим, что только в один день (2 июля 2003 г.) отсутствие облаков было отмечено одновременно сразу над шестью из девяти метеостанций. Такая статистика свидетельствует о том, что относительное количество безоблачных пикселей не должно было превышать 4% от их общего числа, что в 6 ÷ 7 раз меньше количества, отобранного по данным PMD.

Наличие столь малого количества безоблачных пикселей можно объяснить тем, что «Envisat» пролетает над Сибирью около солнечного полудня. В отсутствие слоистых форм облачности к этому времени уже происходит нагрев почвы и появляются кучевые облака, которые, с учетом больших размеров ($60 \times 30 \text{ км}^2$) пикселя SCIAMACHY, будут попадать в его поле зрения с большой степенью вероятности. Практически постоянное присутствие облачности будет неизбежно вызывать занижение оценок LCO_2 и LO_2 , значения которых будут определяться баллом и высотой верхней границы облачности. Для точного определения XCO_2 (или MCO_2) нужно, чтобы эти случайные занижения, выраженные в относительных единицах, были не только коррелированы, но и равны. Принципиально, с учетом, что кислород и углекислый газ хорошо перемешаны в атмосфере, равенство относительных изменений LCO_2 и LO_2 при переходе от безоблачных условий к облачным может быть достигнуто специальным выбором рабочих каналов в полосах поглощения этих газов. В свою очередь, это потребует некоторой модификации существующего алгоритма восстановления концентрации углекислого газа.

Заключение

Публикация результатов прямых самолетных измерений вертикальных профилей концентраций углекислого газа [7–9] в сочетании с открытым доступом к архиву наземных наблюдений Российской метеорологической службы существенно облегчает разработку и тестирование спутниковых алгоритмов определения концентрации CO_2 над территорией Западной Сибири. Очевидно, что только хорошее согласие с данными натурных экспериментов свидетельствует о надежности спутниковых измерений и алгоритмов, используемых при их обработке.

В статье представлены результаты первого использования алгоритма WFM-DOAS, ориентированного на данные спектрометра SCIAMACHY, для двух районов Западной Сибири. В теплый период

года алгоритм показывает хорошее качественное совпадение временного хода определяемой концентрации CO_2 с данными самолетных измерений как в районе Новосибирска, так и в районе Сургута. Диапазон изменчивости в течение года средних месячных концентраций CO_2 по спутниковым оценкам ($12 \div 14 \text{ млн}^{-1}$) практически совпадает с диапазоном изменчивости самолетных измерений ($11 \div 13 \text{ млн}^{-1}$).

В холодный период года спутниковый алгоритм работает неустойчиво и дает сильно заниженные значения концентраций CO_2 . Наиболее вероятной причиной этого является наличие снежного покрова. Спектральные альбедные характеристики снега в полосах поглощения кислорода и углекислого газа резко отличаются от нейтрального по спектру значения альбедо $A = 0,1$, которое использовалось в опорной базе данных WFM-DOAS при восстановлении по данным SCIAMACHY. Следует ожидать, что расширение этой базы данных по спектрам отражения реальных земных поверхностей и выбор конкретного типа поверхности в зависимости от координат пикселя позволят использовать WFM-DOAS-алгоритм и в этих условиях. Наличие снежного покрова может устанавливаться по наземной метеорологической информации, с других спутниковых приборов, а также определяться по данным самого SCIAMACHY.

Для районов Западной Сибири время пролета западно-европейского спутника «Envisat» близко к местному солнечному полудню. В сочетании с большими размерами пикселя SCIAMACHY это приводит к тому, что в поле зрения прибора с вероятностью более 95% все время будет либо слоистая, либо конвективная облачность. Одновременное определение количества молекул CO_2 и O_2 , находящихся в атмосферном столбе между облаками и верхней границей атмосферы, позволяет определять среднюю по высоте концентрацию CO_2 и в этих условиях. Для повышения точности и уменьшения влияния облаков на точность алгоритма определение концентрации CO_2 следует проводить в специально отобранных рабочих каналах SCIAMACHY в полосах поглощения кислорода и углекислого газа.

Настоящая работа проводилась при поддержке Европейского космического агентства и Международной федерации аэронавтики (ESA/IFA project « CO_2 retrieval over boreal forest»).

1. Burrows J.P., Holzle E., Goede A.P.H., Visser H., Fricke W. SCIAMACHY – Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography // Acta astronaut. 1995. V. 35. N 7. P. 445–451.
2. Bovensmann H., Burrows J.P., Buchwitz M., Frerick J., Noel S., Rozanov V.V., Chance K.V., Goede A.H.P. SCIAMACHY – Mission objectives and measurement modes // J. Atmos. Sci. 1999. V. 56. N 2. P. 127–150.
3. Warneke T., de Beek R., Buchwitz M., Notholt J., Schulz A., Velasco V., Schrems O. Shipborne solar absorption measurements of CO_2 , CH_4 , N_2O , and CO and comparison the SCIAMACHY WFM-DOAS retrievals // Atmos. Chem. Phys. 2005. V. 5. N 8. P. 2029–2034.
4. Buchwitz M., de Beek R., Noel S., Burrows J.P., Bovensmann H., Bremer H., Bergamaschi P., Körner S., Heimann M. Carbon monoxide, methane and carbon dioxide columns retrieved from SCIAMACHY by WFM-

- DOAS: year 2003 initial data set // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2005. V. 5. N 2. P. 1943–1971.
5. Baldocchi D.D., Meyers T.P. On using eco-physiological, micrometeorological and biogeochemical theory to evaluate carbon dioxide, water vapor and gaseous deposition fluxes over vegetation // Agric. and Forest Meteorol. 1998. V. 90. N 1–2. P. 1–26.
 6. Gurney K.R., Law R.M., Denning A.S., Rayner P.J., Pak B.C., Baker D., Bousquet P., Bruhwiler L., Chen Y.-H., Ciais P., Fung I.Y., Heimann M., John J., Maki T., Maksyutov S., Peylin P., Prather M., Taguchi S. Transcom 3 inversion intercomparison: Model mean results for the estimation of seasonal carbon sources and sinks // Global Biogeochem. Cycles. 2004. V. 18. N 1. GB1010, doi:10.29/2003GB002111. 18 p.
 7. Center for Global Environmental Research/National Institute for Environmental Studies: Monitoring of GHGs over Siberia. <http://www-cger2.nies.go.jp/moni-e/warm/siberia/am01.html>
 8. Arshinov M.Yu., Belan B.D., Inoue G., Machida T., Panchenko M.V., Fofonov A.V. Dynamics of the vertical distribution of CO₂ and CO concentrations over Western Siberia (1997–2003) // Advances in the Geological Storage of Carbon Dioxide / Ed. S. Lombardi, L.K. Altunina and S.E. Beaubien. New York; Boston; Dordrecht; London; Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2005. P. 11–16.
 9. Зуев В.В., Белан Б.Д., Зуева Н.Е., Иноуэ Г., Махиды Т. Связь стока углекислого газа из атмосферы над бореальными лесами Сибири с колебаниями озоносферы // Оптика атмосф. и океана. 2005. V. 18. № 7. С. 618–620.
 10. <http://meteo.infospace.ru>
 11. SCIAMACHY on ENVISAT-1. A new-generation atmospheric sensor. DLR. D-51179 Cologne, Germany, 1998. 15 p.
 12. Buchwitz M., Rozanov V.V., Burrows J.P. A near infrared optimized DOAS method for the fast global retrieval of atmospheric CH₄, CO, CO₂, H₂O, and N₂O total column amounts from SCIAMACHY / ENVISAT-1 nadir radiances // J. Geophys. Res. D. 2000. V. 105. N 12. P. 15231–15246.
 13. de Beek R., Buchwitz M., Noel S., Burrows J.P., Bovensmann H., Bruns M., Bremer H., Bergamaschi P. Atmospheric carbon gases retrieved from SCIAMACHY by WFM-DOAS: Improved global CO and CH₄ and initial verification of CO₂ over Park Falls (46°N, 90°W) // Atmos. Chem. Phys. (In press, 2005).
 14. ASTER Spectral Library: The United States Geological Survey (USGS-Reston) spectral library collected by Simon J. Hook, 1998. CD-ROM. Version 1.2.
 15. Альbedo и угловые характеристики отражения подстилающей поверхности и облаков / Под ред. К.Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеониздат, 1981. 232 с.

A.N. Rublev, M. Buchwitz, T.B. Zhuravleva. Comparison of satellite and aircraft measurements of CO₂ concentrations over West Siberia.

The altitude-mean CO₂ concentration are reconstructed by the WFM-DOAS algorithm, worked out at the Bremen University (Germany), from the SCIAMACHY spectrometer data (on-board of satellite Envisat). The obtained results are compared with aircraft measurements for two regions of West Siberia (Surgut and Novosibirsk, 2003). The reconstructed CO₂ concentration time behavior qualitatively well agrees with the aircraft data for warm period of the year and significantly underestimated in the presence of snow cover. Possibilities of improving the WFM-DOAS algorithm accuracy are under discussion.