

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

УДК 551.521.32, 551.510.413, 551.507.362.2

**УЧЕТ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ АТМОСФЕРЫ ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ  
ЕЕ СОСТАВА ЗАТМЕННЫМ МЕТОДОМ**

© 2008 г. А. В. Ракитин\*, В. С. Косцов, А. В. Поляков

Научно-исследовательский институт физики, Санкт-Петербургский государственный университет,  
Санкт-Петербург

\*Тел.: (812)428–43–47;

\*e-mail: kit@troll.phys.spbu.ru

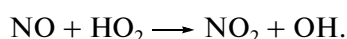
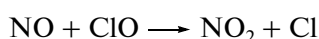
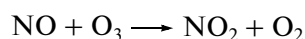
Поступила в редакцию 11.07.2007 г.

Рассмотрен идеализированный спутниковый эксперимент, в котором определяются вертикальные профили содержания фотохимически активных атмосферных газов по измерениям прозрачности атмосферы на восходах и заходах Солнца, а также процедура коррекции получаемых данных, основанная на модельных расчетах изменения концентрации этих газов при зенитных углах Солнца, близких к 90°. Получены оценки погрешностей коррекции профилей содержания NO<sub>2</sub>, обусловленных неопределенностью результатов расчетов факторов коррекции по фотохимическим моделям с высоким разрешением по времени. На примере модели SOCOL проанализирована возможность использования данных трехмерных химико-климатических моделей со средним временным разрешением в процедуре коррекции результатов спутниковых затменных экспериментов.

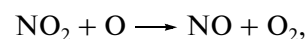
### ВВЕДЕНИЕ

Спутниковые измерения прозрачности атмосферы на восходах и заходах Солнца давно и интенсивно используются для дистанционного определения вертикальных профилей содержания газов. Этот метод, называемый “затменным”, характеризуется высокой потенциальной точностью, хорошим вертикальным разрешением, отсутствием необходимости абсолютной калибровки прибора для получения функций пропускания. Поскольку трассы распространения излучения, регистрируемого в затменном эксперименте, проходят через терминатор, при использовании данного метода для восстановления вертикальных профилей газов, содержание которых испытывает существенные суточные вариации, следует проводить оценки (при необходимости – учет) влияния горизонтальных градиентов концентрации на результаты решения обратной задачи.

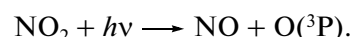
Ниже приведены основные фотохимические процессы, ответственные за суточные вариации газов, которые рассматриваются в настоящей работе (NO<sub>2</sub>, NO, O<sub>3</sub>). В стратосфере в ночное время суток окись азота разрушается с образованием двуокиси азота в основном по следующим реакциям, первая из которых является доминирующей [1, 2]:



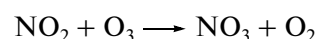
В дневное время суток молекулы NO<sub>2</sub> восстанавливаются NO либо в реакции с атомарным кислородом



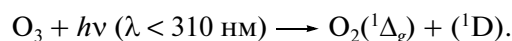
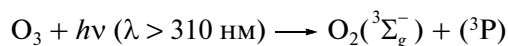
либо путем фотолиза



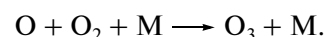
Таким образом, ночные значения концентрации NO<sub>2</sub> превышают дневные значения, а для NO характерна обратная ситуация. Однако разница между значениями концентраций NO<sub>2</sub> ночью и днем не так велика, как разница в значениях ночных и дневных концентраций NO, вследствие разрушения двуокиси азота ночью за счет следующих реакций:



Суточные вариации озона наблюдаются в мезосфере, где в дневное время он фотодиссоциирует по следующим реакциям:



А ночью восстанавливается по реакции



При измерениях солнечного излучения в затменных экспериментах оптическая трасса, естественно, находится в освещенной области, однако зенитный угол Солнца в различных точках трассы различен. На рис. 1 изображена схема

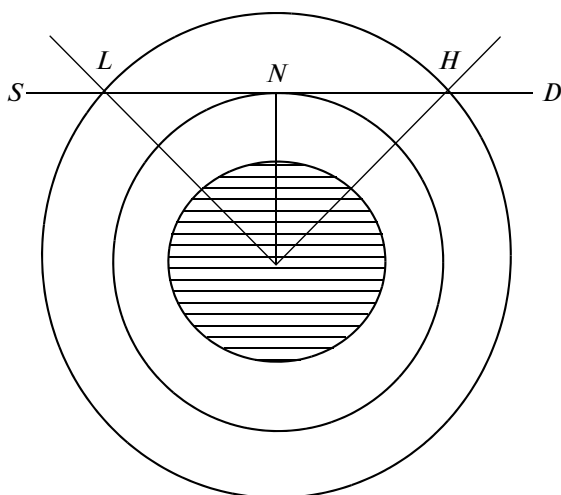


Рис. 1. Схема спутникового затменного эксперимента по измерению прозрачности атмосферы.

спутниковых измерений излучения в затменном эксперименте, где  $S$  – источник излучения (Солнце),  $D$  – спутниковый прибор,  $N$  – прицельная высота. Начальная и конечная точки оптической трассы  $L$  и  $H$  имеют одинаковую высоту, соответствующую высоте условной верхней границы атмосферы. В прицельной точке  $N$  зенитный угол Солнца равен  $90^\circ$ . Очевидно, что на участке трассы  $L-N$  зенитные углы будут меньше  $90^\circ$ , а на участке  $N-H$  больше  $90^\circ$ . Несмотря на то что оба участка освещены, ниже мы будем говорить об участке  $L-N$ , как о “дневном”, и об участке  $N-H$  – как о “ночном”. Диапазон изменения зенитного угла Солнца для трассы составляет примерно  $84^\circ$ – $96^\circ$  (он несколько варьируется в зависимости от прицельной высоты и от заданной условной верхней границы атмосферы). Этот диапазон зенитных углов соответствует периоду существенной нестационарности, когда происходит изменение значений концентрации вследствие изменения фотохимических процессов. В результате распределение концентрации газа вдоль оптической трассы может оказаться несимметричным относительно прицельной точки.

Таким образом, в этом случае приближение сферически однородной атмосферы (СОА) не работает, и задача определения профиля концентрации газа при высотном сканировании (значений концентрации в прицельных точках) существенно усложняется из-за появления большого количества неизвестных параметров (значений концентрации при различных зенитных углах). Для уменьшения количества неизвестных параметров используют так называемые “факторы коррекции”, которые представляют собой отношение концентрации газа  $n$  при заданном зенит-

ном угле Солнца  $\gamma$  к концентрации при зенитном угле  $\gamma_0 = 90^\circ$

$$f(\gamma) = \frac{n(\gamma)}{n(\gamma_0)}. \quad (1)$$

При известных значениях факторов коррекции неизвестными параметрами являются только значения концентрации газа в прицельных точках, и задачу можно рассматривать как “стандартную”. Решение задачи определения профилей концентрации газа с учетом сферической неоднородности будем называть “коррекцией профилей”, поскольку в литературе, как правило, полученные в этом случае результаты сравниваются с результатами, соответствующими приближению сферически однородной атмосферы.

Из изложенного выше следует, что при таком подходе к решению задачи зондирования сферически неоднородной атмосферы (СНА) ключевую роль играет адекватность используемых значений факторов коррекции. Факторы коррекции, как правило, рассчитываются с помощью одномерных (1D) и нульмерных “боксовых” (0D “box”) фотохимических моделей, характеризующихся высоким разрешением по времени, что позволяет воспроизводить “быстрые” изменения концентрации фотохимически активных газов при изменении освещенности. В качестве примеров приведем работы, посвященные корректровке результатов экспериментов ATMOS [3] и HALOE [4]. Учитывая, что различные модели имеют разный уровень полноты описания фотохимических процессов, используют различные исходные данные о параметрах состояния (температура, давление) и о газовом и аэрозольном составе атмосферы, а также, учитывая погрешности в значениях констант скоростей реакций, следует оценивать вклад неопределенности результатов моделирования в погрешности скорректированных профилей. Нам не известны работы, в которых при решении задачи коррекции результатов затменных экспериментов проводились подобные оценки. Следует подчеркнуть, что анализ степени неопределенности данных, полученных по численным фотохимическим моделям, важен и при решении других задач, например, при сопоставлении результатов различных спутниковых экспериментов, рассогласованных по времени. В качестве примера приведем работу [5], посвященную сопоставлению профилей  $\text{NO}_2$ , полученных по данным измерений солнечного излучения спектрометром SCIAMACHY, с профилями, полученными в экспериментах HALOE и SAGE II. На основе расчетов по одномерной фотохимической модели профили, восстановленные по данным HALOE и SAGE II (на восходах и заходах Солнца), трансформировались в профили, соответствующие значениям зенитного угла Солнца

при измерениях SCIAMACHY. При этом учитывалась совокупность факторов, приводящих к неопределенности модельных расчетов (неопределенность профиля температуры, концентрации озона и аэрозоля, констант скоростей фотохимических реакций, “дрейф” модели). Суммарная неопределенность модельных данных, оценивавшаяся как относительное различие в концентрации  $\text{NO}_2$  между “базовым” и “тестовыми” расчетами, составила 19% ниже 20 км, уменьшаясь до 8% на высотах 35–40 км и возрастая выше 40 км до 20% и более. Приведенные значения наглядно демонстрируют важность учета неопределенности модельных данных.

Настоящая работа посвящена:

1) оценкам (в первом приближении) погрешности коррекции профилей, получаемых в затменных экспериментах, которая обусловлена неопределенностью расчетов факторов коррекции по фотохимическим моделям с высоким разрешением по времени. (На актуальность этой задачи было указано выше.);

2) анализу возможности использования современных 3-мерных (3D) химико-климатических моделей (ХКМ) для расчетов факторов коррекции с точностью, достаточной для решения задач коррекции результатов затменных экспериментов;

3) сопоставлению погрешностей определения профилей концентрации  $\text{NO}_2$  по спутниковым измерениям прозрачности в эксперименте SAGE-III с погрешностями коррекции.

Прежде всего отметим, что в настоящей работе для удобства изложения мы употребляем термин “погрешности коррекции”, подразумевая неопределенность в значениях концентрации газа, обусловленную неопределенностью модельных данных. Очевидно, что погрешности, в строгом смысле, мы оценить не можем, поскольку используемый метод основан на сравнении лишь данных различных моделей.

Актуальность решения второй из поставленных задач обусловлена, во-первых, тем, что в настоящее время разработаны 3-мерные глобальные ХКМ, отличающиеся полнотой описания атмосферных процессов и в то же время обладающие хорошим быстродействием и не предъявляющие высоких требований к вычислительным ресурсам [6]. Во-вторых, 3-мерные ХКМ описывают как фотохимические, так и динамические процессы, и обеспечивают получение самосогласованного комплекса атмосферных параметров, необходимых для расчета излучения (температура, давление, значения концентрации газов). Расчеты с использованием ХКМ представляют собой последовательность “мгновенных” глобальных распределений атмосферных параметров с временным шагом порядка 2–3 ч на горизонтальной

пространственной сетке с шагом по широте и долготе около 3–5 град и вертикальной пространственной сетке порядка 2–3 км. Данные такого рода уже используются при решении задач дистанционного зондирования горизонтально неоднородной атмосферы [7, 8]. Следует принимать во внимание, что невысокое пространственное разрешение 3-мерных ХКМ требует использования процедур интерполяции при построении распределений параметров атмосферы вдоль оптических трасс распространения излучения. Это может приводить к значимому сглаживанию получаемых зависимостей концентрации фотохимически активных газов от значения зенитного угла Солнца. В связи с этим задача оценки адекватности воспроизведения 3-мерными ХКМ пространственных неоднородностей, обусловленных различными условиями освещенности, является актуальной.

В НИИ физики СПбГУ была проведена интерпретация измерений прозрачности атмосферы прибором SAGE-III на основе разработанного оригинального комплексного подхода [9, 10]. При решении третьей из поставленных задач нами были использованы погрешности определения профилей концентрации  $\text{NO}_2$ , полученные в СПбГУ.

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В качестве исходных данных в настоящей работе использовались:

1) факторы коррекции для профилей  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  и  $\text{O}_3$ , содержащиеся в базе данных, которую авторам настоящей статьи любезно предоставил М. Натараджан [4]. Факторы рассчитаны в диапазоне высот 10–100 км. Диапазон зенитных углов:  $84^\circ$ – $96^\circ$  (шаг  $0.5^\circ$ ), диапазон широт  $78.75^\circ$  с.ш. –  $78.75^\circ$  (шаг  $11.25^\circ$ ). Сезонный ход представлен данными, соответствующими 22 числу каждого месяца. Концентрации короткоживущих компонент в мезосфере рассчитывались по 1D модели с параметризацией вертикального переноса. Поскольку в стратосфере временной масштаб вертикальных движений много больше, чем временной масштаб фотохимических реакций, ниже 61 км использовалась 0D “box” модель (расчеты для заданной географической координаты, высоты в атмосфере и момента времени). Концентрации долгоживущих компонент рассчитывались по 2D модели. Эти модели подробно описаны в работах [4, 11];

2) факторы коррекции для профилей  $\text{NO}_2$ , рассчитанные по нестационарной фотохимической 0D “box” модели, использующейся в 3D химико-транспортной модели SLIMCAT [12, 13]. Диапазон высот 0 – 58 км. Расчеты по 0D “box” модели

**Таблица 1.** Сценарии сравнения факторов коррекции. Обозначения:  $f_{DB}$ ,  $f_{SO}$  и  $f_{SL}$  (DataBase, SOcol, SLimcat), см. текст

Параметры	Газ		
	O <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	NO
Факторы коррекции	$f_{DB}, f_{SO}$	$f_{DB}, f_{SO}, f_{SL}$	$f_{DB}, f_{SO}$
Широты	60° с.ш., 50° ю.ш.	60° с.ш.	60° с.ш.
Высоты	50–80 км	20–50 км	20–50 км
Сценарии	A1: ноябрь, восход A2: ноябрь, заход A3: август, восход A4: август, заход	B1: июнь, восход B2: июнь, заход B3: декабрь, восход B4: декабрь, заход	C1: июнь, восход C2: июнь, заход C3: декабрь, восход C4: декабрь, заход

проводились нами для широт и моментов времени в соответствии с выбранными сценариями сравнения факторов коррекции (см. ниже);

3) факторы коррекции для NO, NO<sub>2</sub> и O<sub>3</sub>, рассчитанные с использованием глобальной ХКМ SOCOL [6]. Модель имеет высотный диапазон 10–80 км, горизонтальное разрешение 4 x 4, в вертикальном направлении сетка модели неоднородна. Шаг по времени в блоке химии равен 2 ч, в блоке динамики – 15 мин. Выходными данными модели являются “мгновенные” глобальные поля параметров атмосферы, рассчитанные через каждые 2 ч. Факторы коррекции были получены по значениям концентрации газов в узлах пространственной сетки в области терминатора для заданной широты и времени в соответствии с выбранными сценариями.

Для перечисленных факторов коррекции 1)–3) ниже будем использовать обозначения соответственно:  $f_{DB}, f_{SL}, f_{SO}$  (DataBase, SLimcat, SOcol).

Первым этапом исследований было сравнение непосредственно факторов коррекции. Сценарии этого сравнения представлены в табл. 1. Если взять в качестве примера сценарий В1, то из таблицы следует, что в этом сценарии сравниваются факторы коррекции профиля концентрации NO<sub>2</sub>  $f_{DB}, f_{SO}, f_{SL}$  для июня на широте 60° с.ш. в высотном диапазоне 20–50 км в условиях восхода Солнца.

Второй этап исследований заключался в проведении расчетов по оценке погрешностей определения профилей, обусловленных использованием приближения сферически однородной атмосферы, т.е. “без коррекции”. При этом использовался упрощенный подход, преимуществом которого является то, что он позволяет получить требуемые оценки в первом приближении без привлечения информации о характеристиках конкретных спутниковых приборов. Рассмотрим идеализированный спутниковый эксперимент, в котором по измерениям прозрачности определяется значение полной оптической толщины в монохрома-

тическом случае вдоль трассы распространения солнечного излучения

$$\tau = \int_0^{s_0} \alpha(s) n_{\text{CHA}}(s) ds, \quad (2)$$

где  $s$  – координата вдоль оптической трассы,  $\alpha$  – коэффициент поглощения в расчете на одну молекулу (сечение поглощения),  $n_{\text{CHA}}$  – “истинная” концентрация молекул газа, соответствующая сферически неоднородной атмосфере. Пусть в результате решения обратной задачи “без коррекции” в приближении сферически однородной атмосферы получено распределение концентрации  $n_{\text{COA}}$ . При этом

$$\tau = \int_0^{s_0} \alpha(s) n_{\text{COA}}(s) ds. \quad (3)$$

В приближении слабой зависимости сечения поглощения от координаты вдоль оптической трассы  $\alpha(s) \approx \text{const}$ , которое можно использовать в ультрафиолетовой и видимой областях спектра, имеем

$$\int_0^{s_0} n_{\text{CHA}}(s) ds = \int_0^{s_0} n_{\text{COA}}(s) ds = V, \quad (4)$$

где  $V$  – полное содержание газа вдоль трассы. Другими словами, в рассмотренном идеализированном эксперименте значение полного содержания газа вдоль трассы, рассчитанное при использовании приближения COA, соответствует его “истинному” значению.

В конечномерном представлении значение полного содержания  $V$  вдоль трассы

$$V = \sum n_i f_i(\gamma < 90^\circ) s_i + n_0 s_0 + \sum n_i f_i(\gamma > 90^\circ) s_i + b, \quad (5)$$

где  $n_i$  – значения концентрации газа на высоте  $s$  индексом  $i$  при  $\gamma = 90^\circ$ ,  $s_i$  – квадратурные коэффициенты,  $i = 0$  соответствует прицельной точке, суммирование идет по точкам “дневного” и “ноч-

ного” участков трассы,  $b$  – вклад в общее содержание верхних слоев атмосферы, где высотное сканирование не производится, концентрация газа мала (следовательно вклад в общее содержание по трассе пренебрежимо мал), и зависимость концентрации от зенитного угла Солнца пренебрегается.

В векторно-матричной форме формулировка задачи будет выглядеть следующим образом:

$$y = Cx + b, \quad (6)$$

где  $y$  – вектор, элементами которого являются значения полного содержания вдоль набора трасс с различными прицельными высотами,  $x$  – вектор, элементами которого являются значения концентрации газа в прицельных точках, вектор  $b$  представляет собой вклад в полное содержание верхних слоев атмосферы, где высотное сканирование прибором не проводится. Поскольку концентрации газов в верхних слоях атмосферы малы, полагаем этот вектор фиксированным и будет рассчитывать его для средних значений параметров атмосферы. Элементы матрицы  $C$  представляют собой произведения факторов коррекции на квадратурные коэффициенты. Если рассматривать  $y$  как вектор “измерений”, а  $x$  как вектор неизвестных параметров, то решение “обратной задачи” будет выглядеть следующим образом:

$$x = C^{-1}(y - b). \quad (7)$$

Описанный подход и методика коррекции профилей на основе формулы (7) успешно использовалась для коррекции вертикальных профилей озона и  $NO_2$ , полученных по измерениям прозрачности аппаратурой SAGE-III [14]. Полученные результаты (профили озона и  $NO_2$  за весь период работы аппаратуры SAGE-III, откорректированные по указанной методике) доступны для загрузки через сеть Интернет [15].

Схема расчетов по оценке погрешностей определения профилей, когда коррекция не производится вообще (что соответствует приближению сферически однородной атмосферы), была следующей:

1) на основе истинного профиля концентрации газа при  $\gamma = 90^\circ$  и факторов коррекции рассчитывались значения общего содержания газа вдоль трассы – вектор  $y'$ . Таким образом, моделировались “измерения” в сферически неоднородной атмосфере;

2) все значения факторов коррекции в элементах матрицы  $C$  принимались равными единице (приближение COA);

3) по формуле (7) определялся профиль концентрации газа, соответствующий приближению COA. Полученный профиль сравнивался с истинным.

Третий этап исследований заключался в оценке погрешностей коррекции, обусловленных неопределенностями факторов коррекции. Использовалась схема расчетов, аналогичная вышеописанной, но со следующими изменениями: рассматривались по два набора факторов коррекции, при этом полагалось, что один из наборов описывает истинное состояние атмосферы, а другой используется для решения задачи коррекции профиля: в формуле (7) элементы матрицы  $C$  содержат значения факторов коррекции из этого набора. Очевидно, что использование одинаковых наборов приведет к точному решению, а в случае двух разных наборов погрешность коррекции будет зависеть и от того, какой из наборов является истинным, а какой “корректировочным”.

В общем виде процедуру оценок погрешностей на втором и третьем этапе исследований можно представить в виде

$$x = C_2^{-1} C_1 x_{ист.}, \quad (8)$$

где  $x$  и  $x_{ист.}$  – получаемый и истинный профили концентрации,  $C_1$  – матрица, элементы которой содержат факторы коррекции, описывающие истинное состояние атмосферы,  $C_2$  – матрица, элементы которой содержат факторы коррекции, равные единице (случай отсутствия коррекции), или факторы коррекции из набора, отличного от истинного (случай наличия неопределенности в значениях факторов коррекции).

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Прежде чем перейти к сопоставлению факторов коррекции, подчеркнем, что для рассмотренных сценариев данные модели SOCOL характеризовались шагом по зенитному углу около  $2^\circ$ . На графиках факторы коррекции представлены с шагом по зенитному углу  $0.5^\circ$ , соответствующем шагу моделей с высоким временным разрешением (данные модели SOCOL интерполировались).

Рассмотрим результаты сопоставления факторов коррекции для  $NO_2$ . Рис. 2 демонстрирует факторы коррекции в соответствии со сценарием В1 (июнь,  $60^\circ$  с.ш., восход Солнца) для высот 20, 30, 40 и 50 км. На высоте 20 км в диапазоне значений зенитного угла Солнца  $96^\circ$ – $90^\circ$  факторы коррекции  $f_{SL}$ ,  $f_{DB}$  и  $f_{SO}$  хорошо согласуются, плавно уменьшаясь от 1.25–1.3 до 1.0. При дальнейшем уменьшении зенитного угла  $f_{SL}$  и  $f_{DB}$  уменьшаются до 0.8 при  $\gamma = 84^\circ$ , а значения  $f_{SO}$  примерно постоянны и близки к 1.0. На высоте 30 км значения  $f_{SL}$  заметно превышают значения других факторов коррекции в “ночной” области. На “дневном” участке все факторы коррекции демонстрируют очень хорошее качественное и количественное согласие. Высота 40 км характеризуется хорошим совпадением значений  $f_{SL}$  и  $f_{DB}$  во всем диапазоне

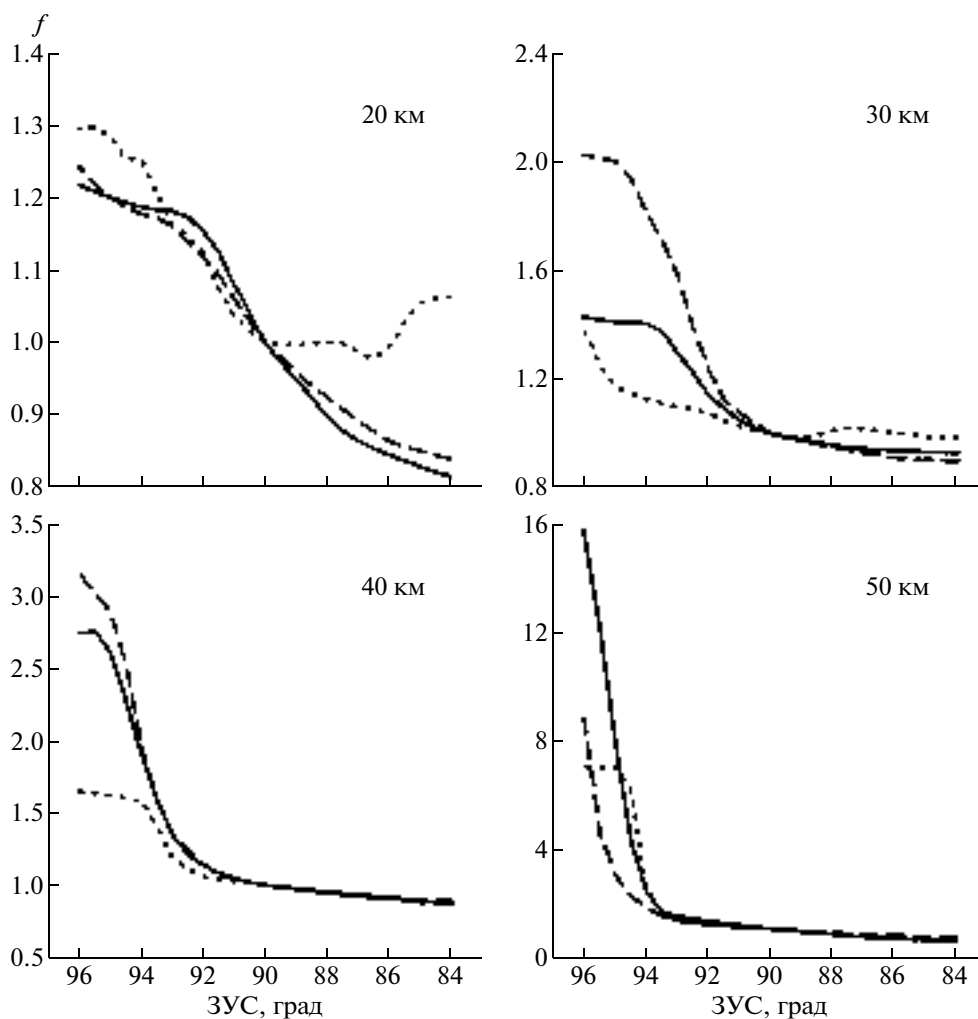


Рис. 2. Зависимость факторов коррекции  $\text{NO}_2$  от ЗУС на высотах 20, 30, 40 и 50 км в июне в условиях восхода Солнца (сценарий В1):  $f_{\text{DB}}$  – сплошная линия;  $f_{\text{SL}}$  – штрихи;  $f_{\text{SO}}$  – точки.

зенитных углов, а на высоте 50 км согласие уже наблюдается между  $f_{\text{DB}}$  и  $f_{\text{SO}}$  в диапазоне углов  $\gamma = 84^\circ$ – $95^\circ$ , затем значения  $f_{\text{DB}}$  резко возрастают до  $\approx 16$  при  $\gamma = 96^\circ$  а значения  $f_{\text{SO}}$  остаются постоянными. Факторы  $f_{\text{SL}}$  согласуются с другими факторами в диапазоне  $\gamma$  от  $84^\circ$  до  $94^\circ$  и показывает меньшие значения на  $94^\circ$ – $95^\circ$ . Сценарий В2, соответствующий заходу Солнца, но тем же географическим и сезонным условиям, что и В1, продемонстрировал аналогичные результаты.

Результаты сопоставления факторов коррекции по сценарию В3, соответствующему декабрю,  $60^\circ$  с.ш. и условиям восхода Солнца, представлены на рис. 3. Обратим внимание на результаты, соответствующие высоте 20 км. Если рассмотреть полный суточный ход содержания  $\text{NO}_2$  (см, например, работу [16], в которой представлены результаты моделирования суточного хода на широте г. Москвы на высотах 10, 20, 30 и 40 км для всех сезонов), то можно отметить, что в декабре для этой

высоты характерно особенно сильное уменьшение содержания  $\text{NO}_2$  в течение ночи, а увеличение содержания  $\text{NO}_2$  начинается практически сразу после восхода Солнца. Факторы коррекции  $f_{\text{SL}}$  и  $f_{\text{SO}}$  показывают это увеличение содержания – их значения растут от 0.3–0.6 при  $\gamma = 96^\circ$  до 3.0 при  $\gamma = 84^\circ$ . А фактор коррекции  $f_{\text{DB}}$  в рассматриваемом диапазоне зенитных углов практически постояен и близок единице. На высоте 30 км  $f_{\text{SO}}$  также демонстрирует некоторое увеличение содержания  $\text{NO}_2$  сразу после восхода, аналогично ситуации на высоте 20 км, а факторы  $f_{\text{SL}}$  и  $f_{\text{DB}}$  указывают на резкое уменьшение содержания  $\text{NO}_2$  на восходе в диапазоне зенитных углов  $95^\circ$ – $92^\circ$  и дальнейшее плавное уменьшение вплоть до  $\gamma = 86^\circ$ . На высоте 40 км все факторы согласуются качественно, но имеют различные значения в максимуме:  $f_{\text{SL}} \approx 9$ ,  $f_{\text{DB}} \approx 5$ ,  $f_{\text{SO}} \approx 3$ . На высоте 50 км значения  $f_{\text{DB}}$  в максимуме достигают 35, сильно отличаясь от значений  $f_{\text{SL}}$  и  $f_{\text{SO}}$ , которые хорошо

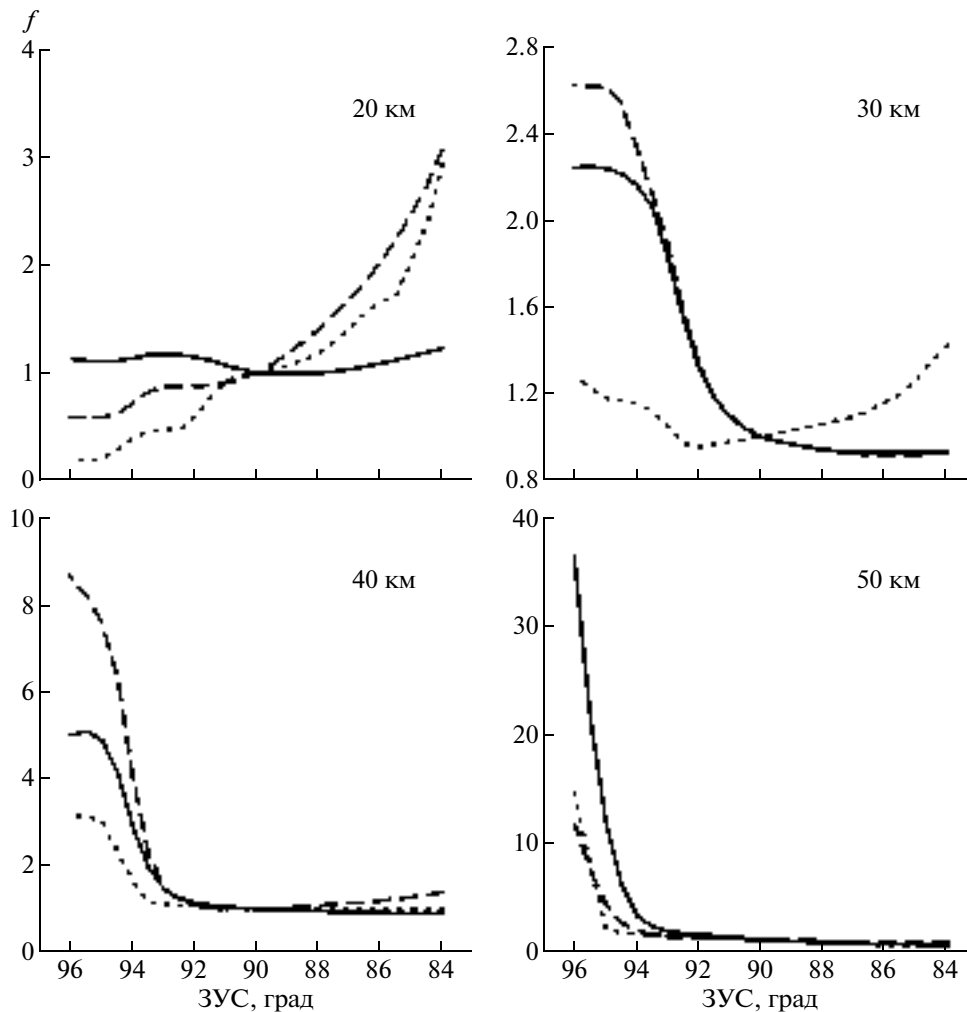


Рис. 3. Зависимость факторов коррекции  $\text{NO}_2$  от ЗУС на высотах 20, 30, 40 и 50 км в декабре в условиях восхода Солнца (сценарий В3):  $f_{\text{DB}}$  – сплошная линия;  $f_{\text{SL}}$  – штрихи;  $f_{\text{SO}}$  – точки.

согласуются между собой и в максимуме примерно одинаковы (12 и 15 соответственно).

При расчетах погрешности корректировки профилей  $\text{NO}_2$  в качестве “эталона” нами были выбраны факторы коррекции  $f_{\text{DB}}$ , т.е. расчеты общего содержания  $\text{NO}_2$  вдоль трасс проводились на основе распределений концентрации, соответствующих факторам  $f_{\text{DB}}$ . Результаты, полученные для четырех сценариев В1–В4, представлены на рис. 4. Для удобства анализа полученных результатов введем следующие обозначения:

1)  $E_{\text{экс}}$  – погрешности определения профиля  $\text{NO}_2$  в спутниковом эксперименте SAGE-III, полученные в приближении COA и обусловленные различными факторами (аппаратурные шумы, априорная информация и т.д.), но не учитывающие эффект суточных вариаций концентрации  $\text{NO}_2$ ;

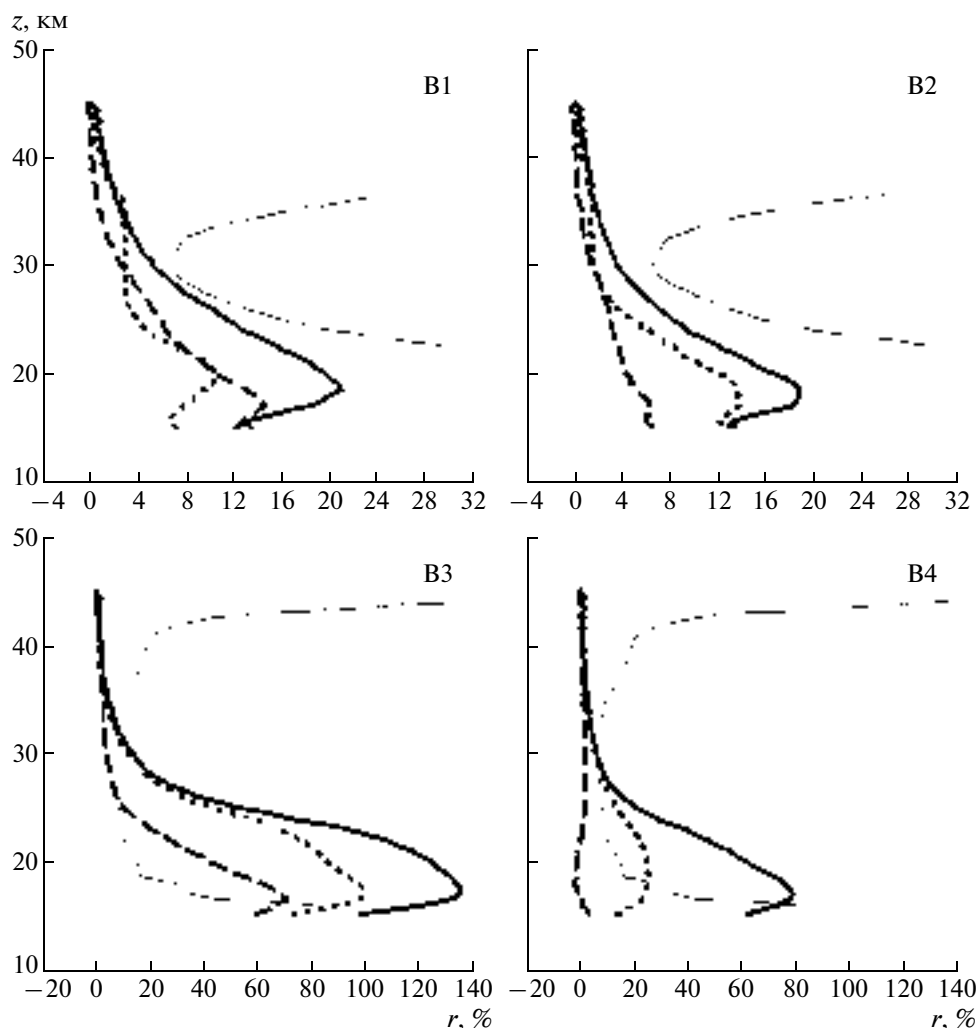
2)  $E_{\text{COA}}$  – погрешности, обусловленные приближением COA;

3)  $E_{\text{корр1}}$  – погрешности коррекции, обусловленные неопределенностью факторов коррекции в случае использования моделей с высоким временным разрешением, для оценки  $E_{\text{корр1}}$  использовалась комбинация факторов коррекции ( $f_{\text{DB}}, f_{\text{SL}}$ );

4)  $E_{\text{корр2}}$  – погрешности коррекции, обусловленные неопределенностью факторов коррекции в случае использования 3D XKM (типа SOCOL), для оценки  $E_{\text{корр2}}$  использовалась комбинация факторов коррекции ( $f_{\text{DB}}, f_{\text{SO}}$ ).

Погрешности  $E_{\text{COA}}$  минимальны в июне и составляют в максимуме (на высоте около 18 км) около 20%. Максимальные значения  $E_{\text{COA}}$  имеют место в декабре на восходе солнца – в высотном диапазоне 15–23 км они превышают 100%. На заходе солнца в максимуме погрешности достигают 80% (на высоте около 18 км).

Перейдем к рассмотрению погрешностей определения профиля  $\text{NO}_2$ , обусловленных неопределенностью факторов коррекции, рассчитанных по



**Рис. 4.** Погрешности определения профилей концентрации  $\text{NO}_2$ :  $E_{\text{экс}}$  – штрихпунктир;  $E_{\text{СОА}}$  – сплошные линии;  $E_{\text{корр1}}$  – штрихи;  $E_{\text{корр2}}$  – точки. Результаты представлены для четырех сценариев.

фотохимическим моделям с высоким разрешением по времени  $E_{\text{корр1}}$ . Для сценария В1 “июнь, восход” в окрестности 15 км погрешности данного типа равны погрешностям  $E_{\text{СОА}}$ . В диапазоне высот 18–30 км погрешности уменьшаются от 14% до 2%. Эти значения лишь в 1.5–2 раза меньше значений погрешности  $E_{\text{СОА}}$ . Как показывают проведенные расчеты, на восходе солнца значения  $E_{\text{корр1}}$  заметно больше, чем на заходе. Для сценария В3 значения  $E_{\text{корр1}}$  в максимуме достигают 60%. Однако для сценария В3 эти погрешности становятся пренебрежимо малыми уже начиная с высоты 25 км. Для сценариев В2 и В4 (заход) погрешности  $E_{\text{корр1}}$  существенно меньше погрешностей  $E_{\text{СОА}}$  и не превышают 6%.

Проанализируем погрешности  $E_{\text{корр2}}$ , случай коррекции с использованием факторов, полученных по ХКМ с невысоким разрешением по времени (модель SOCOL, набор факторов  $f_{\text{SO}}$ ). Прежде всего отметим, что для июня эти погреш-

ности практически совпадают с погрешностями  $E_{\text{СОА}}$  выше 35 км, а для декабря – выше 25 км. На высотах 15–30 км в сценарии В1 и 26–30 км в сценарии В2 эти погрешности близки к погрешностям  $E_{\text{корр1}}$ . Наибольшие значения  $E_{\text{корр2}}$  имеют место в сценариях В2, В3 и В4. В сценарии В3 они сопоставимы по величине с  $E_{\text{СОА}}$  во всем рассмотренном диапазоне высот. Однако, несмотря на то что в сценарии В4 значения  $E_{\text{корр2}}$  достигают 25%, они существенно меньше, чем значения  $E_{\text{СОА}}$ .

Соотношение значений  $E_{\text{экс}}$  и остальных погрешностей существенно различно для июня и декабря. В июне высотная зависимость  $E_{\text{экс}}$  имеет ярко выраженный минимум на 30 км, где значения  $E_{\text{экс}}$  составляет 8%. Ниже и выше 30 км наблюдается резкое увеличение значений  $E_{\text{экс}}$ . Во всем рассматриваемом высотном диапазоне  $E_{\text{экс}}$  превышает значения остальных погрешностей. Таким образом, вклад горизонтальной неоднородности, как источника ошибок, в результаты



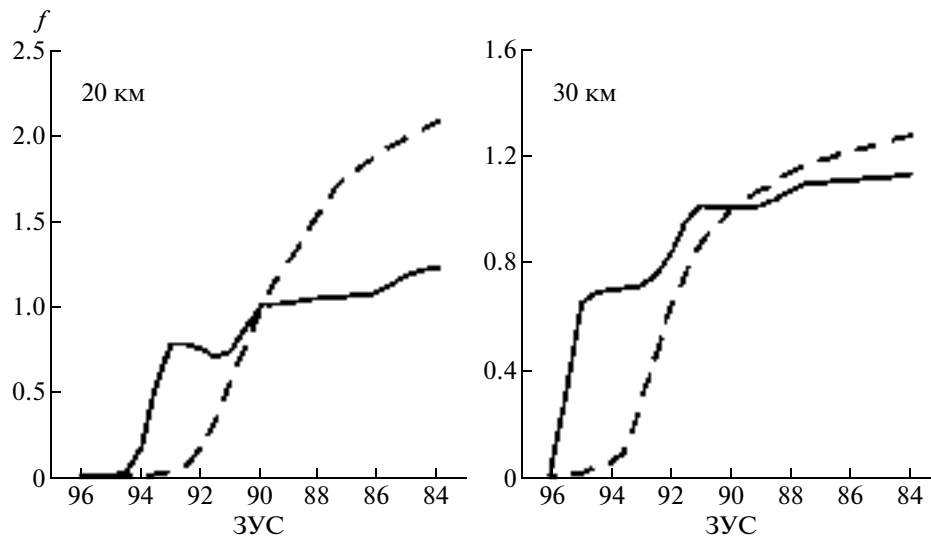


Рис. 5. Зависимость факторов коррекции  $\text{NO } f_{\text{SO}}$  (сплошная линия) и  $f_{\text{DV}}$  (пунктир) от ЗУС на высотах 20 и 30 км в июне в условиях восхода Солнца (сценарий С1).

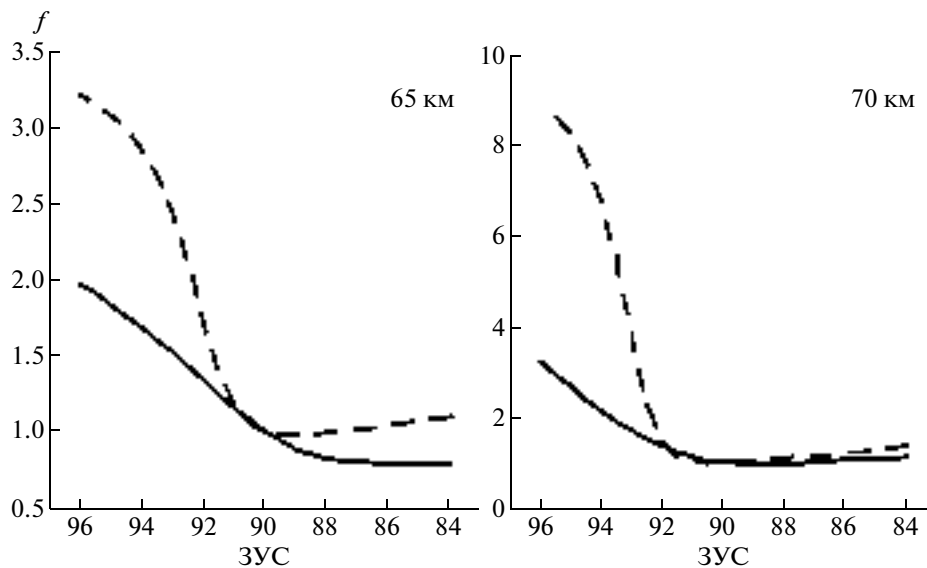


Рис. 6. Зависимость факторов коррекции  $\text{O}_3 f_{\text{SO}}$  (сплошная линия) и  $f_{\text{DV}}$  (пунктир) от ЗУС на высотах 65 и 70 км в ноябре в условиях восхода Солнца (сценарий А1).

определения профилей концентрации  $\text{NO}_2$  незначителен.

В декабре ярко выраженный минимум  $E_{\text{экс}}$  отсутствует, значения  $E_{\text{экс}}$  примерно постоянны в диапазоне высот 20–40 км и составляют 10–20%. Выше 40 км и ниже 20 км значения  $E_{\text{экс}}$  резко возрастают. Во-первых, отметим, что для сценария В3  $E_{\text{экс}}$  заметно меньше  $E_{\text{СОА}}$  до высоты 30 км, а в сценарии В4 – до 25 км, что свидетельствует о важности проведения процедуры коррекции. При этом для сценария В3  $E_{\text{экс}}$  меньше значений  $E_{\text{корр1}}$  на высотах 17–25 км. Поэтому при коррек-

ции необходимо принимать во внимание и влияние неопределенности модельных расчетов факторов коррекции.

Как показали расчеты, проведенные для  $\text{NO}_2$ , значения  $E_{\text{корр2}}$  в большинстве случаев (сценарии В2, В3, В4) существенно больше значений  $E_{\text{корр1}}$ , что свидетельствует о проблематичности использования данных трехмерных глобальных ХКМ в процедуре коррекции. Исследования, проведенные для других газов ( $\text{NO}$  и  $\text{O}_3$ ), подтвердили этот вывод. В качестве иллюстрации приведем рис. 5 и 6, на которых сопоставлены факторы коррекции

**Таблица 2.** Сопоставление погрешностей  $E_{\text{корр2}}$  и  $E_{\text{СОА}}$  для профилей NO и озона

Газ, высота слоя (км)	Сезон	Восход		Заход	
		$E_{\text{корр2}}$ , %	$E_{\text{СОА}}$ , %	$E_{\text{корр2}}$ , %	$E_{\text{СОА}}$ , %
O <sub>3</sub>	Август	5–15	25	4–7	8
55–65	Ноябрь	2–16	17	4–6	6
NO	Июнь	50	60	50	60
15–20	Декабрь	220	320	85	215

профилей NO и озона  $f_{\text{DV}}$  и  $f_{\text{SO}}$ . Рис. 5 демонстрирует не только количественные, но и качественные отличия. Факторы коррекции  $f_{\text{DV}}$  и  $f_{\text{SO}}$  для профиля озона, показанные на рис. 6, согласуются качественно, близки в дневной области, однако в ночной области отличаются в 1.5–3 раза. В рамках настоящей работы проводилось также сопоставление погрешностей  $E_{\text{СОА}}$  и  $E_{\text{корр2}}$  для профилей NO и озона по сценариям, представленным в табл. 1. Полученные результаты сведены в табл. 2. Как видно из таблицы в ряде случаев значения  $E_{\text{корр2}}$  могут достигать значений  $E_{\text{СОА}}$ : для NO в июне (восход, заход), для озона в августе (заход) и в декабре (заход). Отметим, что несмотря на то, что  $E_{\text{корр2}}$  для NO в декабре заметно меньше  $E_{\text{СОА}}$ , сами значения  $E_{\text{корр2}}$  очень велики (220% на восходе и 85% на заходе).

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Рассмотрена задача коррекции профилей концентрации фотохимически активных атмосферных газов, определяемых по данным спутниковых затменных экспериментов (измерения прозрачности).

Проведен анализ факторов коррекции, описывающих изменения концентрации при изменении освещенности на заходах и восходах Солнца. Для анализа использовались факторы коррекции, полученные по данным различных численных моделей (с высоким и низким разрешением по времени).

Оценены погрешности коррекции профилей концентрации NO<sub>2</sub>, обусловленные неопределенностями в значениях факторов коррекции, полученных по данным моделей с высоким временным разрешением. Показано, что эти погрешности наиболее существенны для условий восхода Солнца.

Получены оценки погрешности коррекции профилей концентрации NO<sub>2</sub>, в случае использования глобальной ХКМ SOCOL для расчета факторов коррекции. Значительные величины этих погрешностей свидетельствуют о проблематичности использования данных трехмерных глобальных ХКМ в процедуре коррекции. Этот вы-

вод подтвержден и проведенными аналогичными расчетами для коррекции профилей NO и озона.

Сопоставление погрешностей коррекции с погрешностями спутникового метода определения концентрации NO<sub>2</sub> (эксперимент SAGE-III) показало, что при оценке полной погрешности профилей концентрации (интерпретация спутниковых измерений прозрачности плюс коррекция профилей) учет погрешности коррекции важен (в частности, согласно проведенным исследованиям, в средних широтах зимой).

Авторы выражают благодарность Розанову Е.В. и Егоровой Т.А. (Observatory and World Radiation Center PMOD/WRC, Switzerland) за предоставление и сопровождение модели SOCOL, а также за обсуждение работы, Янковскому В.А. и Мануйловой Р.О. (НИИ физики СПбГУ) за плодотворные дискуссии по теме работы и ценные замечания.

Работа выполнена при поддержке РФФИ исследовании (гранты 06-05-64987, 06-05-64909), а также Министерства образования и науки РФ (гранты РНП.2.1.1.4166, РНП.2.2.1.1.3836).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Solomon S., Russell J.M. III, Gordley L.L. Observations of the Diurnal Variation of Nitrogen Dioxide in the Stratosphere // J. Geophys. Res. 1986. V. 91. № D5. P. 5455-5464.
2. Брасье Г., Соломон С. Аэрономия средней атмосферы. Химия и физика стратосферы и мезосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 414 с.
3. Newchurch M.J., Allen M., Gunson M.R. et al. Stratospheric NO and NO<sub>2</sub> abundances from ATMOS solar-occultation measurements // Geophys. Res. Lett. 1996. V. 23. № 17. P. 2373–2376.
4. Natarajan M., Deaver L.E., Thompson E., Magill B. Impact of twilight gradients on the retrieval of mesospheric ozone from HALOE // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. № D13305, doi:10.1029/2004JD005719.
5. Bracher A., Sinnhuber M., Rozanov A., Burrows J.P. Using a photochemical model for the validation of NO<sub>2</sub> satellite measurements at different solar zenith angles // Atmos. Chem. Phys. 2005. V. 5. P. 393–408.
6. Egorova T., Rozanov E., Zubov V., Manzini E. et al.. Chemistry-climate model SOCOL: a validation of the

- present-day climatology // *Atmos. Chem. Phys.* 2005. V. 5. P. 1557–1576.
7. *Ridolfi M., Magnani L., Carlotti M., Dinelli B.M.* MIPAS-ENVISAT limb-sounding measurements: trade-off study for improvement of horizontal resolution // *Applied Optics*. 2004. V. 43. № 31. P. 5814–5824
  8. *Ракитин А.В., Косцов В.С.* Границы применимости приближения сферически однородной атмосферы в задаче спутникового дистанционного ИК-зондирования мезосферы на касательных трассах // *Исслед. Земли из космоса*. 2005. № 5. С. 10–17.
  9. *Поляков А.В., Тимофеев Ю.М.* Влияние алгоритма решения обратной задачи на результаты зондирования атмосферы затменным методом (аппаратура SAGE III) // *Исслед. Земли из космоса*. 2004. № 5. С. 15–20.
  10. *Поляков А. В., Тимофеев Ю. М., Ионоу Д. В. и др.* Новая интерпретация измерений прозрачности спутниковым спектрометром SAGE III // *Изв. РАН. Сер. Физика атмосферы и океана*. 2005. Т. 41, № 3. С. 410–422.
  11. *Natarajan M., Remsberg E.E., Gordley L.L.* Ozone budget in the upper stratosphere: Model studies using the reprocessed LIMS and the HALOE datasets // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. № 7. doi:10.1029/2001GL014262.
  12. *Chipperfield M.P.* Multiannual simulations with a three-dimensional chemical transport model // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. P. 1781–1805.
  13. Интернет ресурс по модели SLIMCAT: <http://www.env.leeds.ac.uk/slimcat>
  14. *Поляков А.В., Рэндалл К., Харвей Л., Хоке К.* Новый усовершенствованный алгоритм интерпретации затменных измерений прибором SAGE III // *Исслед. Земли из космоса*. 2008. № 1. С. 31–36.
  15. Интернет-ресурс по интерпретации данных эксперимента SAGE-III в НИИ физики СПбГУ: [http://troll.phys.spbu.ru/Personal\\_pages/Polyakov/sage/sage.html](http://troll.phys.spbu.ru/Personal_pages/Polyakov/sage/sage.html)
  16. *Елохов А.С., Груздев А.Н.* Измерения общего содержания и вертикального распределения NO<sub>2</sub> на Звенигородской научной станции // *Изв. РАН. Сер. Физика атмосферы и океана*. 2000. Т. 36. № 6. С. 831–846.

## Accounting for Nonsteady State of the Atmosphere when Sounding its Composition by Occultation Method

A. V. Rakitin, V. S. Kostsov, A. V. Polyakov

*Research Institute of Physics, St. Petersburg State University, St. Petersburg*

An idealized satellite experiment based on atmospheric transmittance measurements by occultation method at sunrises and sunsets and intended for retrieval of photochemically active atmospheric gases has been considered. The experimental data correction procedure which utilizes model calculations of gas concentration variations at solar zenith angles close to 90° has been analyzed. The estimations have been obtained of the NO<sub>2</sub> profile correction errors stipulated by uncertainty of correction factor calculations by models with high temporal resolution. By the example of SOCOL model, the possibility of application of 3-D chemical transport model data with moderate temporal resolution to the correction of the results of satellite occultation experiments has been analyzed.