

УДК 551.510.43

ВОССТАНОВЛЕНИЕ НОЧНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК МЕЗОСФЕРЫ – НИЖНЕЙ ТЕРМОСФЕРЫ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

© 2024 г. М. Ю. Куликов^{a, b, *}, М. В. Беликович^{a, b}, А. Г. Чубаров^{a, b}, С. О. Дементьева^a,
А. М. Фейгин^{a, b}

^aИнститут прикладной физики РАН им. А.В. Гапонова-Грехова, ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород,
603950 Россия

^bНижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород,
603022 Россия

*e-mail: kulm@ipfran.ru

Поступила в редакцию 27.02.2023 г.

После доработки 22.09.2023 г.

Принята к публикации 15.11.2023 г.

База данных спутниковой кампании SABER/TIMED включает в себя результаты восстановления ночных распределений О, Н и некоторых других характеристик на высотах мезосферы – нижней термосферы по данным измерений профилей объемной скорости эмиссии ОН* вблизи 2 мкм, температуры и озона. В основе процедуры восстановления лежит приближение химического равновесия ночного озона, а также модель двух возбужденных уровней ОН ($v = 9.8$), формирующих указанное излучение. В данной работе модернизированная модель этих уровней с исправленными константами, соответствующими опубликованным данным, применена для восстановления О, Н, ОН, НО₂ и скорости химического нагрева на высотах 80–100 км по данным измерений SABER/TIMED в 2002–2021 гг. Обнаружено, что новые параметры процедуры восстановления приводят к значительным (до 2 раз и более) изменениям в пространственных распределениях О, Н и скорости химического нагрева, но лишь незначительно изменяют распределения ОН и НО₂.

Ключевые слова: область мезопаузы, озон, атомарный кислород, возбужденный гидроксил, спутниковые измерения

DOI: 10.31857/S0002351524010086

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что малые примеси (МП) средней атмосферы и физико-химические процессы с их участием – один из ключевых факторов, определяющий фундаментальные свойства структуры и динамики данной области атмосферы. В частности, они оказывают существенное влияние на радиационный и тепловой баланс, например, обеспечивают один из основных источников нагрева воздуха в средней атмосфере за счет поглощения УФ излучения Солнца и последующих экзотермических реакций. С другой стороны, эволюция МП подвержена влиянию всех типов атмосферного переноса, чувствительна к температуре, вариациям солнечной освещенности и др., т.е. МП

являются важными индикаторами и трассерами основных атмосферных процессов, в том числе обусловленных климатическими изменениями. Их пространственное распределение и эволюция определяются взаимосвязанными физическими и химическими процессами, образующими сложную систему, изменчивость которой в общем случае описывается химико-транспортными моделями – системами дифференциальных уравнений высокого порядка.

Экспериментальное наблюдение МП средней атмосферы производится с помощью двух групп методов: контактных и дистанционных. Контактные измерения осуществляются посредством самолетов, зондов (стратостатов) или ракет и, как

Статья подготовлена на основе устного доклада, представленного на IV Всероссийской конференции с международным участием “Турбулентность, динамика атмосферы и климата”, посвященной памяти академика А.М. Обухова (Москва, 22–24 ноября 2022 г.).

правило, обеспечивают более высокую точность измерений. При этом они имеют ряд ограничений и обеспечивают фрагментарное покрытие атмосферы как по времени, так и в пространстве. В сравнении с ними дистанционные измерения обладают большими возможностями. В частности, спутниковые методы позволяют вести регулярные наблюдения и охватывают среднюю атмосферу глобально, так что в настоящее время именно эти методы обеспечивают основной объем данных. Одной из основных проблем дистанционных методов является точность измерений: в большинстве случаев они оперируют с интегральным сигналом (характеризуемым спектром собственного излучения/поглощения атмосферы), приходящим, как правило, из широкого диапазона высот и во многих случаях довольно сильно зашумленным, что дает заметную случайную и систематическую ошибку в измеренных данных. Кроме того, далеко не все МП средней атмосферы имеют соответствующие линии поглощения/излучения с нужной интенсивностью в технически доступных диапазонах длин волн.

Хорошо известный способ увеличить информативность экспериментальных данных — использование химико-транспортных моделей для извлечения информации о неизмеряемых характеристиках по экспериментальным данным. В рамках такого подхода модель выступает в качестве априорной связи между измеряемыми непосредственно и восстанавливаемыми характеристиками. Эти связи могут применяться для восстановления неизмеряемых МП из имеющихся экспериментальных данных, независимого определения других характеристик атмосферы (например, температуры), валидации данных одновременных наблюдений нескольких МП, оценки констант химических реакций, известных с большой погрешностью, источников (эмиссий) и др. (см. обзор в [Kulikov et al., 2018a]). Отметим, что привлечение моделей к обработке измеряемых данных может значительно (в разы) увеличивать информативность результатов экспериментальных кампаний по исследованию атмосферы.

Наиболее простая модель, позволяющая осуществить указанный подход, основана на условии

локального (как во времени, так и в пространстве) фотохимического/химического баланса (равновесия) между источниками и стоками так называемых “быстрых” переменных модели: концентраций МП со сравнительно малыми (в том числе — относительно характерных времен переноса) временами жизни. С математической точки зрения, данное условие не означает пребывание данных переменных в состоянии равновесия, но при его выполнении соответствующие концентрации могут сколь угодно близко подходить к своим мгновенно-равновесным значениям. Степень “равновесности” каждой быстрой компоненты определяется соотношением между временем ее жизни и характерным временем изменения ее мгновенно-равновесной концентрации. При этом из-за сильной диссипации в большинстве случаев (кроме особых ситуаций, когда в ансамбле быстрых компонент присутствуют формируемые ими медленные семейства) нет необходимости следить за выполнением закона сохранения массы и можно отбрасывать малосущественные стоки и источники, в том числе обусловленные переносом, практически без потери точности. В результате получаемые алгебраические соотношения являются наиболее простыми априорными локальными связями между измеряемыми и неизмеряемыми МП атмосферы.

Уже несколько десятилетий условия равновесия озона и возбужденных состояний OH , O и O_2 используются для определения распределений компонент семейств нечетного кислорода O_x (O , $\text{O}(^1\text{D})$, O_3) и водорода HO_x (H , OH , HO_2) на высотах мезосферы — нижней термосферы (МНТ, 50–105 км) по данным дневных и ночных ракетных и спутниковых измерений [Evans, Llewellyn, 1973; Good, 1976; Pendleton et al., 1983; McDade et al., 1985; McDade, Llewellyn, 1988; Evans et al., 1988; Thomas, 1990; Llewellyn et al., 1993; Llewellyn, McDade, 1996; Mlynchak et al., 2007, 2013a, 2013b, 2014; Smith et al., 2010; Siskind et al., 2008, 2015]. Отметим, что наиболее важные компоненты этих семейств O и H фактически недоступны прямым регулярным измерениям. В частности, начиная с 2002, успешно продолжается миссия прибора SABER на спутнике TIMED, так что к настоящему моменту накоплены значительные

массивы непрерывных измерений профилей температуры, давления, концентрации озона, объемной скорости эмиссии OH^* вблизи 2 мкм в результате переходов (9–7), (8–6) и др. в широких диапазонах локальных времен (0–24 ч) и широт (82° ю.ш., 82° с.ш.) с довольно высоким пространственно-временным разрешением (например, по вертикали до 0.25 км). Авторы SABER долгое время применяют полученные данные для определения пространственно-временных распределений О и Н (а по ним – некоторых других характеристик) с использованием условия фотохимического/химического равновесия озона и модели OH^* на уровнях $\nu = 8$ и 9 [Mlynchzak et al., 2007, 2013a, 2013b, 2014]. В частности, полагается, что в ночное время условие химического равновесия озона выполняется на высотах 80–100 км. Сравнительно недавно стартовала кампания по существенной ревизии указанных подходов к восстановлению О и Н как по данным SABER/TIMED, так и некоторых других экспериментов (в частности, SCIAMACHY) [Sharma et al., 2015; Kalogerakis et al., 2016; Panka et al., 2017, 2018, 2021; Mlynchzak et al., 2018; Zhu, Kaufmann, 2018, 2019; Fytterer et al., 2019; Kalogerakis, 2019]. В наших работах [Kulikov et al., 2017, 2018b, 2019; Belikovitch et al., 2018] проведено комплексное исследование выполнимости условий дневного и ночного равновесия озона на высотах МНТ, в том числе с помощью 3D химико-транспортного моделирования годового цикла фотохимии этой области. Показано, в частности, что ночное условие равновесия озона хорошо (с отклонением и дисперсией менее 10%) выполняется выше некоторой границы, чье положение варьируется в диапазоне высот 81–90 км и сложным образом зависит от координат и сезона. Обработка данных SABER выявила, что использование условия ночного равновесия ниже этой границы приводит к значительной (до 5–8 раз) недооценке концентрации О на высотах 80–85 км.

В недавней работе [Kulikov et al., 2022] проведен анализ параметров модели OH^* , используемой в работах [Mlynchzak et al., 2013a, 2013b, 2014, 2018]. Оказалось, что основная масса констант возбуждения и гашения OH^* на уровнях $\nu = 8$ и 9 не соответствует опубликованным дан-

ным лабораторных измерений и моделирования [Makhlouf et al., 1995; Adler-Golden, 1997; Xu et al., 2012; Caridade et al., 2013]. Применение исправленной модели к дневным данным SABER/TIMED выявило значительные изменения в восстановленных распределениях дневных концентраций О, Н, ОН и HO_2 .

Целью данной работы является (1) восстановление ночных О, Н, ОН, HO_2 и скорости химического нагрева на высотах 80–100 км по данным измерений SABER/TIMED в 2002–2021 гг. с помощью модернизированной в [Kulikov et al., 2022] модели OH^* , (2) сравнение полученных распределений с данными, определяемыми по модели OH^* авторов SABER, последняя версия которой представлена в работе [Mlynchzak et al., 2018], (3) определение основных причин расхождений между двумя наборами данных.

2. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МНТ ПО ДАННЫМ SABER/TIMED: ОБЩИЙ ПОДХОД

Как уже отмечалось, в основе метода [Mlynchzak et al., 2007, 2013a, 2013b, 2014, 2018] лежит условие химического равновесия озона. Баланс ночного озона на высотах МНТ определяется двумя основными реакциями: (1) $\text{O} + \text{O}_2 + \text{M} \rightarrow \text{O}_3 + \text{M}$ и (2) $\text{H} + \text{O}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{OH}$, в соответствии с которыми условие равновесия этой компоненты выглядит следующим образом:

$$k_1 \cdot \text{M} \cdot \text{O}_2 \cdot \text{O} = k_2 \cdot \text{H} \cdot \text{O}_3, \quad (1)$$

где k_i – константы реакций, представленные в табл. 1. Их значения соответствуют последним данным NASA JPL.

Второе уравнение, необходимое для восстановления О и Н, следует из модели OH^* (см. табл. 2) для уровней $\nu = 8$ и $\nu = 9$, основным источником которых является реакция $\text{H} + \text{O}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{OH}(\nu)$. Измеряемая объемная скорость эмиссии OH^* вблизи 2 мкм есть сумма объемных скоростей спонтанной эмиссии в результате переходов (9–7) и (8–6):

$$\text{VER}_{2\mu\text{m}} = V_{97} + V_{86}, \quad (2)$$

которые, в свою очередь, определяются следующими выражениями:

$$\begin{cases} V_{97} = E_{97} \cdot \text{OH}_9 \\ V_{86} = E_{86} \cdot \text{OH}_8, \end{cases} \quad (3)$$

где $(\text{OH}_8, \text{OH}_9)$ — концентрации OH^* на уровнях $v = 8$ и $v = 9$, (E_{97}, E_{86}) — соответствующие коэффициенты. Локальные концентрации OH^* на этих уровнях определяются из условия физико-химического равновесия. При этом учитывается, что молекулы OH^* на 9-м уровне “рождаются” за счет реакции $\text{H} + \text{O}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{OH}$, а “гибнут” в результате одноквантовых или мультиквантовых переходов на нижележащие уровни в результате спонтанного излучения или гашения в столкновениях с O , O_2 или N_2 . В случае OH^* на 8-м уровне рассматриваются эти же процессы, только добавляется рождение за счет переходов с 9-го уровня. В результате концентрации OH^* на этих уровнях можно записать в следующем виде:

$$\text{OH}_9 = \frac{f_9 \cdot k_2 \cdot \text{H} \cdot \text{O}_3}{B_9 \cdot \text{O}_2 + C_9 \cdot \text{O} + D_9 \cdot \text{N}_2 + E_9}, \quad (4)$$

$$\text{OH}_8 = \frac{f_8 \cdot k_2 \cdot \text{H} \cdot \text{O}_3 + B_{98} \cdot \text{OH}_9 \cdot \text{O}_2 + D_{98} \cdot \text{OH}_9 \cdot \text{N}_2 + E_{98} \cdot \text{OH}_9}{B_8 \cdot \text{O}_2 + C_8 \cdot \text{O} + D_8 \cdot \text{N}_2 + E_8}, \quad (5)$$

где f_8 и f_9 — доли OH^* , образующиеся в состояниях $v = 8$ и $v = 9$ за счет реакции $\text{O}_3 + \text{H} \rightarrow \text{O}_2 + \text{OH}(v)$, E_{vv} и $E_{vv'}$ — коэффициенты Эйнштейна для различных переходов из этих состояний вниз, B_v , C_v , D_v , $B_{vv'}$, $C_{vv'}$, $D_{vv'}$ — коэффициенты скорости релаксации состояний $v = 8$ и $v = 9$ при столкновениях с O_2 , N_2 и O . Во второй колонке табл. 2 представлены величины этих констант, используемые авторами данных SABER/TIMED [Mlynchak et al., 2013a, 2018] для восстановления O и H .

Комбинируя уравнения (2)–(5), нетрудно получить, что

$$\text{VER}_{2\mu\text{m}} = k_2 \cdot \text{H} \cdot \text{O}_3 \cdot A(T, \text{O}_2, \text{N}_2, \text{O}), \quad (6)$$

$$\begin{aligned} A(T, \text{O}_2, \text{N}_2, \text{O}) = & \frac{f_9 \cdot E_{97}}{E_9 + B_9 \cdot \text{O}_2 + C_9 \cdot \text{O} + D_9 \cdot \text{N}_2} + \\ & + \frac{f_8 \cdot E_{86}}{E_8 + B_8 \cdot \text{O}_2 + C_8 \cdot \text{O} + D_8 \cdot \text{N}_2} + \\ & + \frac{f_9 \cdot E_{86}}{E_9 + B_9 \cdot \text{O}_2 + C_9 \cdot \text{O} + D_9 \cdot \text{N}_2} \times \\ & \times \frac{B_{98} \cdot \text{O}_2 + D_{98} \cdot \text{N}_2 + B_{98} + C_{98} + E_{98}}{B_8 \cdot \text{O}_2 + C_8 \cdot \text{O} + D_8 \cdot \text{N}_2 + E_8}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $A(T, \text{O}_2, \text{N}_2, \text{O})$ — функция, зависящая от кон-

центраций O_2 , N_2 и O различных констант возбуждения и релаксации OH^* на уровнях $v = 8$ и 9 . Каждая пара локальных значений концентраций O и H определяется по одному единичному кванту измененных данных $(\text{VER}_{2\mu\text{m}}, T, \text{O}_2, \text{N}_2)$, используя уравнения (1) и (7)–(8).

Локальные ночные концентрации OH и HO_2 определяются из условия химического равновесия этих компонент, используя исходные данные измерений и результаты восстановления O и H :

$$\text{OH} = \frac{k_4 \cdot \text{O} \cdot \text{HO}_2 + k_2 \cdot \text{O}_3 \cdot \text{H} + 2k_7 \cdot \text{H} \cdot \text{HO}_2}{k_3 \cdot \text{O} + k_6 \cdot \text{O}_3 + k_{10} \cdot \text{HO}_2}, \quad (8)$$

$$\text{HO}_2 = \frac{k_5 \cdot \text{H} \cdot \text{M} \cdot \text{O}_2 + k_6 \cdot \text{O}_3 \cdot \text{OH}}{k_4 \cdot \text{O} + (k_7 + k_8 + k_9) \cdot \text{H} + k_{10} \cdot \text{OH}}. \quad (9)$$

Локальная скорость ночного химического нагрева рассчитывается как сумма семи отдельных скоростей нагрева за счет экзотермических реакций 1–5 и 11–12 [Mlynchak et al., 2013b], представленных в табл. 1.

Таблица 1. Основные химические реакции с участием компонент семейств HO_x (H , OH , HO_2) и O_x (O , O_3 , $\text{O}(^1\text{D})$) на высотах МНТ в ночное время, M — молекула воздуха

	Реакция	Скорость
1	$\text{O} + \text{O}_2 + \text{M} \rightarrow \text{O}_3 + \text{M}$	$k_1 = 6.1 \cdot 10^{-34}(298/T)^{2.4}$
2	$\text{H} + \text{O}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{OH}$	$k_2 = 1.4 \cdot 10^{-10} \exp(-470/T)$
3	$\text{O} + \text{OH} \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}$	$k_3 = 1.8 \cdot 10^{-11} \exp(180/T)$
4	$\text{O} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{OH}$	$k_4 = 3 \cdot 10^{-11} \exp(200/T)$
5	$\text{H} + \text{O}_2 + \text{M} \rightarrow \text{HO}_2 + \text{M}$	$k_5 = 5.3 \cdot 10^{-32}(298/T)^{1.8}$
6	$\text{O}_3 + \text{OH} \rightarrow \text{O}_2 + \text{HO}_2$	$k_6 = 1.7 \cdot 10^{-12} \exp(-940/T)$
7	$\text{H} + \text{HO}_2 \rightarrow 2\text{OH}$	$k_7 = 7.2 \cdot 10^{-11}$
8	$\text{H} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2$	$k_8 = 6.9 \cdot 10^{-12}$
9	$\text{H} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{O} + \text{H}_2\text{O}$	$k_9 = 1.6 \cdot 10^{-12}$
10	$\text{OH} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$	$k_{10} = 4.8 \cdot 10^{-11} \exp(250/T)$
11	$\text{O} + \text{O} + \text{M} \rightarrow \text{O}_2 + \text{M}$	$k_{11} = 4.7 \cdot 10^{-33}(298/T)^2$
12	$\text{O} + \text{O}_3 \rightarrow 2\text{O}_2$	$k_{12} = 8 \cdot 10^{-12} \exp(-2060/T)$

В третьей колонке табл. 2 представлены константы модели OH^* , соответствующие опубликованным данным лабораторных измерений и моделирования. Можно видеть, что заметная часть констант возбуждения и гашения OH^* на уровнях $v = 8$ и 9 в модели авторов данных SABER/TIMED [Mlynchak et al., 2013a, 2018] имеет довольно сильные отличия от данных работ [Makhlouf et al., 1995; Adler-Golden, 1997; Xu et al., 2012; Caridade et al., 2013]. Наиболее существенные расхождения наблюдаются между ве-

Таблица 2. Список физико-химических процессов и их констант с участием верхних двух уровней ОН*

Процесс	Коэффициенты из работ [Mlynczak et al., 2013a, 2018]	Данные лабораторных измерений и моделирования
$\text{H} + \text{O}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{OH}(9,8)$	$f_9 = 0.47, f_8 = 0.34$	$f_9 = 0.47, f_8 = 0.34$ [Adler-Golden, 1997]
$\text{OH}(9) \rightarrow \text{OH}(v=0-8) + h\nu$	$E_9 = 215.05 \text{ c}^{-1}$	$E_9 = 199.2495 \text{ c}^{-1}$ [Xu et al., 2012]
$\text{OH}(8) \rightarrow \text{OH}(v=0-7) + h\nu$	$E_8 = 178.06 \text{ c}^{-1}$	$E_8 = 171.5238 \text{ c}^{-1}$ [Xu et al., 2012]
$\text{OH}(9) \rightarrow \text{OH}(v'=8) + h\nu$	$E_{98} = 20.05 \text{ c}^{-1}$	$E_{98} = 18.3507 \text{ c}^{-1}$ [Xu et al., 2012]
$\text{OH}(9) \rightarrow \text{OH}(v'=7) + h\nu$	$E_{97} = 118.35 \text{ c}^{-1}$	$E_{97} = 112.4054 \text{ c}^{-1}$ [Xu et al., 2012]
$\text{OH}(8) \rightarrow \text{OH}(v'=6) + h\nu$	$E_{86} = 117.21 \text{ c}^{-1}$	$E_{86} = 116.6081 \text{ c}^{-1}$ [Xu et al., 2012]
$\text{OH}(9) + \text{O}_2 \rightarrow \text{OH}(0-8) + \text{O}_2$	$B_9 = 2.5 \cdot 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{c}$	$B_9 = 3.1 \cdot 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{c}$ [Adler-Golden, 1997]
$\text{OH}(9) + \text{O} \rightarrow \text{OH}(0-8) + \text{O}$	$C_9 = 3 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{c}$	$C_9 = (8.54; 7.66; 6.81; 6.29; 6.16) \cdot 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{c}$ при $T = (110, 160, 210, 255, 300) \text{ K}$ [Caridade et al., 2013]
$\text{OH}(9) + \text{N}_2 \rightarrow \text{OH}(0-8) + \text{N}_2$	$D_9 = 3.36 \cdot 10^{-13} \cdot \exp(220/T) \text{ cm}^3/\text{c}$	$D_9 = 4.8 \cdot 10^{-13} \text{ cm}^3/\text{c}$ [Makhlouf et al., 1995]
$\text{OH}(8) + \text{O}_2 \rightarrow \text{OH}(0-7) + \text{O}_2$	$B_8 = 4.8 \cdot 10^{-13} \text{ cm}^3/\text{c}$	$B_8 = 1.19 \cdot 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{c}$ [Adler-Golden, 1997]
$\text{OH}(8) + \text{O} \rightarrow \text{OH}(0-7) + \text{O}$	$C_8 = 1.5 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{c}$	$C_8 = (8.07; 7.28; 6.66; 6.37; 6.16) \cdot 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{c}$ при $T = (110, 160, 210, 255, 300) \text{ K}$ [Caridade et al., 2013]
$\text{OH}(8) + \text{N}_2 \rightarrow \text{OH}(0-7) + \text{N}_2$	$D_8 = 7 \cdot 10^{-13} \text{ cm}^3/\text{c}$	$D_8 = 2.7 \cdot 10^{-13} \text{ cm}^3/\text{c}$ [Makhlouf et al., 1995]
$\text{OH}(9) + \text{O}_2 \rightarrow \text{OH}(8) + \text{O}_2$	$B_{98} = 4.2 \cdot 10^{-12} \text{ cm}^3/\text{c}$	$B_{98} = 4.2 \cdot 10^{-12} \text{ cm}^3/\text{c}$ [Adler-Golden, 1997]
$\text{OH}(9) + \text{O} \rightarrow \text{OH}(8) + \text{O}$	$C_{98} = 0$	$C_{98} = (3.4; 4; 2.6; 3.1; 3.3) \cdot 10^{-12} \text{ cm}^3/\text{c}$ при $T = (110, 160, 210, 255, 300) \text{ K}$ [Caridade et al., 2013]
$\text{OH}(9) + \text{N}_2 \rightarrow \text{OH}(8) + \text{N}_2$	$D_{98} = 4 \cdot 10^{-13} \text{ cm}^3/\text{c}$	$D_{98} = 4.8 \cdot 10^{-13} \text{ cm}^3/\text{c}$ [Makhlouf et al., 1995]

личинами констант всех одноквантовых и мультиквантовых переходов с этих уровней вниз за счет столкновений с O , O_2 и N_2 . В частности, константа процесса $\text{OH}(8) + \text{O}_2 \rightarrow \text{OH}(0-7) + \text{O}_2$ оказывается ниже примерно в 25 раз. Более того, такой процесс, как $\text{OH}(v=9) + \text{O} \rightarrow \text{OH}(v=8) + \text{O}$ вообще исключен из рассмотрения в [Mlynczak et al., 2013a, 2018].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МНТ ПО ДАННЫМ SABER/TIMED

Чтобы проанализировать влияние рассмотренных параметров модели ОН* на качество восстановления ночных распределений O , H , OH , HO_2 и скорости химического нагрева (CHR), была использована версия 2.0 (Level2A) базы данных SABER (<https://saber.gats-inc.com/>, доступ открытый) одновременно измеренных профилей T , O_3 и $\text{VER}_{2\mu\text{m}}$ в диапазоне давлений 0.01–0.00032 гПа (примерно 80–100 км) за 2002–2021 гг. Чтобы отстроиться от переходных процессов вблизи восхода и захода, были приняты в рассмотрение только моменты зенитного

угла Солнца $\chi > 95^\circ$. С помощью уравнений (1) и (7) были рассчитаны ряды данных, отвечающие новым (O , H , OH , HO_2 и CHR) и старым (O' , H' , OH' , HO_2' и CHR') наборам значений параметров функции $A(T, \text{O}_2, \text{N}_2, \text{O})$ соответственно (см. 3 и 2 колонки в табл. 2). В результате по одному и тому же набору экспериментальных данных были получены два пространственно-временных ряда каждой восстанавливаемой характеристики в диапазоне широт (82° ю.ш., 82° с.ш.) длиной 20 лет. Каждый ряд был усреднен по долготе, в узких ($\sim 4^\circ$) широтных интервалах и во времени в зависимости от сезона, т.е. для получения, например, летнего распределения усреднялись данные, приходящиеся на все летние месяцы 2002–2021 гг. Далее производилось попарное сравнение полученных распределений, отвечающих разным моделям, и в зависимости от сезона для каждой восстановленной характеристики МНТ определялось распределение относительной разницы.

Систематическая погрешность полученных данных в основном определяется систематическими погрешностями данных температуры, O_3 и

скоростей химических реакций. Следуя [Mlynarczyk et al., 2013a, 2014] была рассчитана индивидуальная чувствительность каждой характеристики к возмущению отдельного фактора. В результате обнаружено, что суммарные неопределенности O, H, OH и HO_2 изменяются, в основном, в пределах $\sim(20\text{--}30)\%$ в зависимости от высоты и широты. Благодаря усреднению по большим (20000–40000 значений в каждой пространственной точке) ансамблям, случайная ошибка представленных ниже данных много меньше систематической.

На рис. 1 представлены полученные распределения O и относительной разницы $\text{OP}_\text{O} = \frac{\text{O} - \text{O}'}{\text{O}'}$

в зависимости от сезона. Можно видеть, что (1) в весенне-осеннее время характерны 2 основных пика концентрации O, лежащие вблизи границы низких и средних широт каждого полушария, (2) в зимне-летнее время эта симметрия разрушается, пик в летнем полушарии становится главным, он сдвигается к полярным широтам, именно здесь наблюдается абсолютный максимум концентрации O ($\sim 6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$). Относительная разность OP_O является заметной во все сезоны. Можно видеть, что только в районе 90–93 км OP_O не превышает $\sim \pm 0.2$. Выше этого диапазона высот OP_O уменьшается до -0.4 , а выше — монотонно возрастает с уменьшением высоты во все сезоны и на всех широтах, достигая ~ 1.4 на 80 км. Таким образом, можно заключить, что новые параметры процедуры восстановления приводят к значительному возрастанию концентрации O ниже 90 км и заметному ее уменьшению вблизи 100 км.

На рис. 2 представлены распределения H и относительной разницы $\text{OP}_\text{H} = \frac{\text{H} - \text{H}'}{\text{H}'}$ в зависимости от сезона. Можно видеть, что (1) в весенне-осеннее время наибольшие значения (до $\sim 4 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$) концентрации этой компоненты сосредоточены на 80–85 км на низких и средних широтах обоих полушарий, (2) в зимне-летнее время эта область расширяется до 90–95 км и смещается в область высоких широт летнего полушария, именно здесь наблюдается абсолютный максимум концентрации H (до $\sim (7\text{--}8) \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$). Как и в предыдущем случае, относительная разность OP_H является заметной во все сезоны. Более того,

структурно широтно-высотная зависимость OP_H копирует распределения OP_O , т.е. новые параметры процедуры восстановления приводят к значительному (до 140%) возрастанию концентрации H ниже 90 км и заметному (до 40%) ее уменьшению вблизи 100 км.

На рис. 3–4 представлены распределения OH, HO_2 , $\text{OP}_\text{OH} = \frac{\text{OH} - \text{OH}'}{\text{OH}'}$ и $\text{OP}_\text{HO}_2 = \frac{\text{HO}_2 - \text{HO}_2'}{\text{HO}_2'}$ в зависимости от сезона. Максимумы значений OH (до $\sim (6\text{--}7) \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$) расположены в высоких летних широтах в районе $\sim 80\text{--}85$ км и по своему положению они соответствуют максимумам H. Распределения HO_2 повторяют в основном сезонно-широтные вариации OH, но демонстрируют более низкие значения. Можно видеть, что относительные отклонения OP_OH и OP_HO_2 везде и во все сезоны меньше 10–20%. Таким образом, можно заключить, что новая процедура восстановления не приводит к заметным изменениям распределений OH и HO_2 .

На рис. 5 представлены распределения CHR и относительной разницы $\text{OP}_\text{CHR} = \frac{\text{CHR} - \text{CHR}'}{\text{CHR}'}$

в зависимости от сезона 2002–2021 г. Можно видеть, что (1) в весенне-осеннее время характерны 3 основных максимума CHR с характерными значениями 6–10 К/сут, лежащие на 85–95 км вблизи экватора и полюсов каждого полушария, при этом наблюдается небольшое различие в величинах высокоширотных максимумов, которое меняется на противоположное при смене сезона, (2) в период декабрь — январь — февраль на высоких широтах северного полушария возникает мощный (до 14 К/сут) максимум на 90–93 км, который довольно слабо воспроизводится в южном полушарии в период сентябрь — октябрь — ноябрь. Как у в случае O и H, относительная разность OP_CHR является заметной во все сезоны. Можно видеть, что новая процедура восстановления приводит к значительному (до 150%) возрастанию скорости химического нагрева ниже 90 км и заметному (до 60%) ее уменьшению вблизи 100 км.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Из рис. 1, в частности, можно видеть, что в нижней части (80–90 км) рассматриваемого ди-

апазона высот концентрация O заметно меньше, чем на 90–100 км. В то же время для концентрации воздуха имеет место обратная ситуация. Это означает, что на 80–90 км гашение OH^* на уровнях $v = 8$ и 9 в значительной степени определяется столкновениями с O_2 и N_2 , но выше этого диапазона высот процесс $OH(v) + O$ становится преобладающим. Сравнение констант процессов, представленных в табл. 2, показывает, что данные работ [Makhlouf et al., 1995; Adler-Golden, 1997; Xu et al., 2012; Caridade et al., 2013] заметно

увеличивают скорости таких процессов, как $OH(9) + O_2 \rightarrow OH(0-8) + O_2$ и $OH(8) + O_2 \rightarrow OH(0-7) + O_2$, и уменьшают скорости процессов $OH(9) + O \rightarrow OH(0-8) + O$ и $OH(8) + O \rightarrow OH(0-7) + O$. Это означает, что при прочих равных изменение констант этих процессов приводит к уменьшению значений функции $A(O, M, T)$ на 80–90 км и увеличению на 90–100 км, что за счет связей (1) и (6) выражается в результатах восстановления O , N и скорости химического нагрева, представленных на рис. 1–2 и 5. Более того,

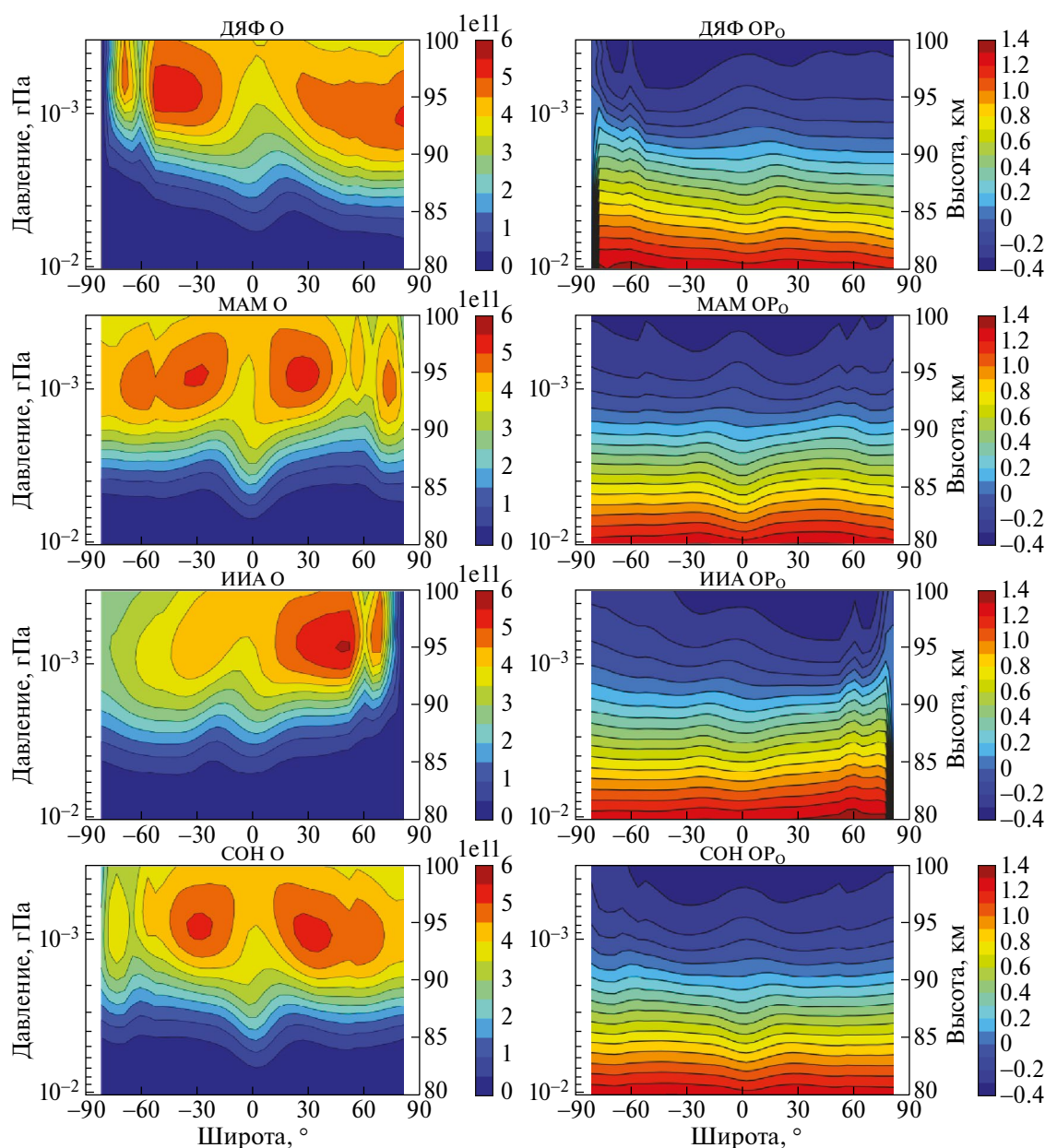


Рис. 1. Усредненные по долготе и времени (за каждый сезон 2002–2021 гг.) ночные распределения O (левая колонка, в см^{-3}) и OP_O (правая колонка). 1 ряд – декабрь, январь, февраль, 2 ряд – март, апрель, май, 3 ряд – июнь, июль, август, 4 ряд – сентябрь, октябрь, ноябрь.

именно пропорциональность значений O и H , следующая из (1), приводит к идентичности широтно-высотных распределений OP_O и OP_H . В то же время относительные отклонения OP_{OH} и OP_{HO_2} значительно отличаются от OP_O и OP_H , несмотря на то, что OH и HO_2 определяются через O и H . Мы провели количественный анализ отдельных членов уравнений (8)–(9), который выявил, что в первом приближении реакции 6 и 10 (см. табл. 1) являются менее существенными, чем остальные, и могут быть отброшены. Укоро-

ченные условия равновесия этих компонент выглядят следующим образом:

$$HO_2 \approx \frac{k_5 \cdot H \cdot M \cdot O_2}{k_4 \cdot O + (k_7 + k_8 + k_9) \cdot H}, \quad (10)$$

$$OH \approx \frac{k_4 \cdot O \cdot HO_2 + k_2 \cdot O_3 \cdot H + 2k_7 \cdot H \cdot HO_2}{k_3 \cdot O}. \quad (11)$$

С учетом (1) их можно переписать в виде, не зависящем от констант процессов, представленных в табл. 2:

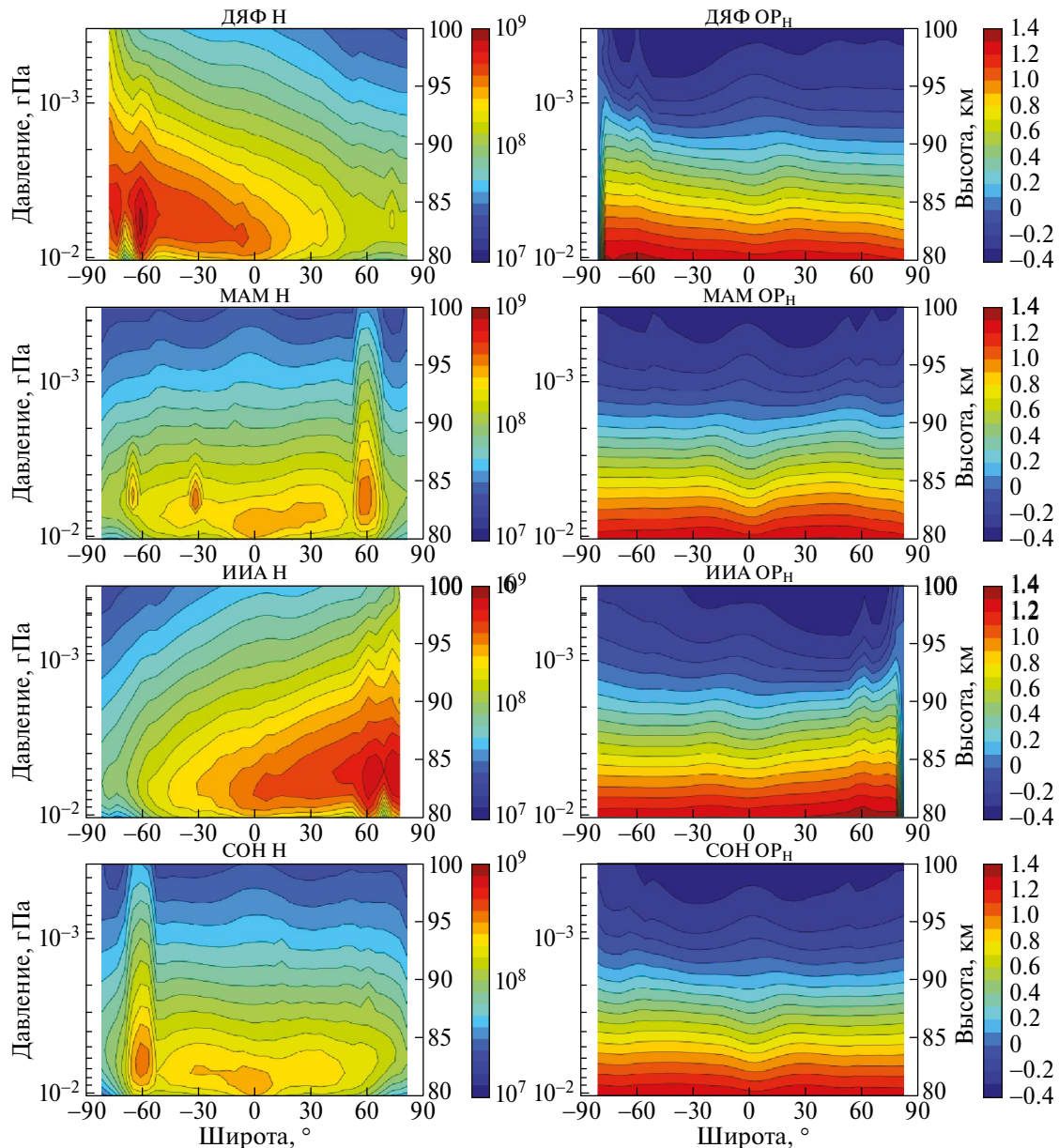


Рис. 2. Усредненные по долготе и времени (за каждый сезон 2002–2021 гг.) ночные распределения H (левая колонка, в см^{-3}) и OH (правая колонка). 1 ряд – декабрь, январь, февраль, 2 ряд – март, апрель, май, 3 ряд – июнь, июль, август, 4 ряд – сентябрь, октябрь, ноябрь.

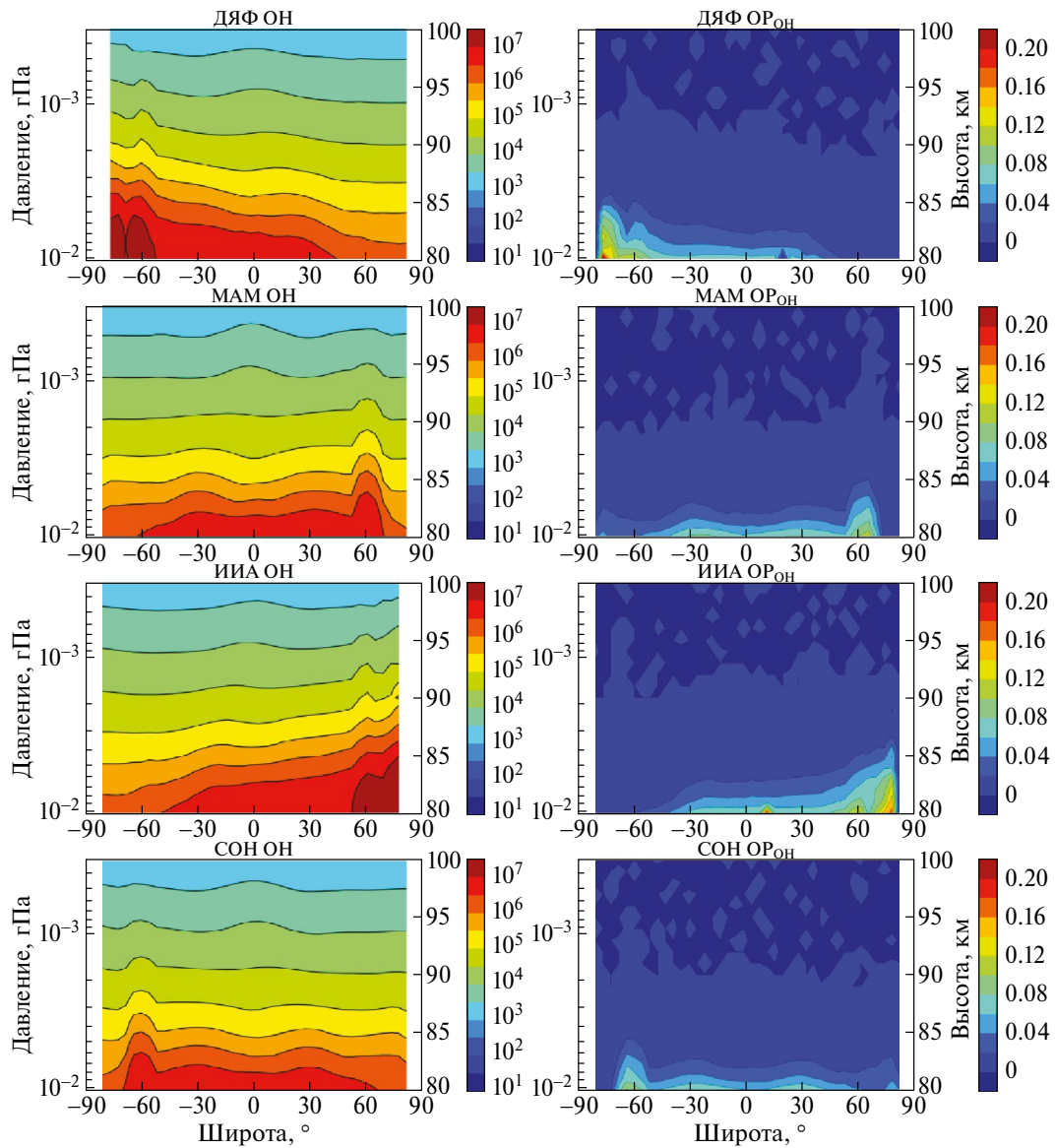


Рис. 3. Усредненные по долготе и времени (за каждый сезон 2002–2021 гг.) ночные распределения ОН (левая колонка, в см^{-3}) и $\text{ОР}_{\text{ОН}}$ (правая колонка). 1 ряд – декабрь, январь, февраль, 2 ряд – март, апрель, май, 3 ряд – июнь, июль, август, 4 ряд – сентябрь, октябрь, ноябрь.

$$\text{HO}_2 \approx \frac{k_5 \cdot k_1 \cdot M^2 \cdot \text{O}_2^2}{k_4 \cdot k_2 \cdot \text{O}_3 + (k_7 + k_8 + k_9) \cdot k_1 \cdot M \cdot \text{O}_2}, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{ОН} \approx & \left(\frac{k_4}{k_3} + \frac{2k_7 \cdot k_1 \cdot M \cdot \text{O}_2}{k_3 \cdot k_2 \cdot \text{O}_3} \right) \times \\ & \times \frac{k_5 \cdot k_1 \cdot M^2 \cdot \text{O}_2^2}{k_4 \cdot k_2 \cdot \text{O}_3 + (k_7 + k_8 + k_9) \cdot k_1 \cdot M \cdot \text{O}_2} + \quad (13) \\ & + \frac{k_1 \cdot M \cdot \text{O}_2}{k_3}. \end{aligned}$$

Именно поэтому изменение констант модели ОН^* не приводит к существенным изменениям распределений ОН и HO_2 , показанных на рис. 3–4.

Скорость химического нагрева пропорциональна сумме скоростей реакций 1–5, 11–12:

$$\begin{aligned} \text{CHR} \sim & k_1 \cdot M \cdot \text{O}_2 \cdot \text{O} + k_2 \cdot \text{O}_3 \cdot \text{H} + \\ & + k_3 \cdot \text{ОН} \cdot \text{O} + k_4 \cdot \text{HO}_2 \cdot \text{O} + \quad (14) \\ & + k_5 \cdot M \cdot \text{O}_2 \cdot \text{H} + k_{11} \cdot \text{O}_3 \cdot \text{O} + k_{12} \cdot M \cdot \text{O}^2. \end{aligned}$$

Можно видеть, что в этом выражении почти все члены линейны по H или O . Именно поэтому распределение ОР_{CHR} в целом соответствует ОР_{O} и ОР_{H} . Некоторые отличия выше 90 км вызваны наличием нелинейности за счет экзотермической реакции $\text{O} + \text{O} + M \rightarrow \text{O}_2 + M$.

Во введении было отмечено, что О и Н недоступны прямым регулярным измерениям на высотах МНТ. На рис. 6 представлены вертикальные профили О, усредненные в диапазоне $0-20^\circ$ с.ш. за осень 2005 и зиму 2005–2006 гг. соответственно, отвечающие разным моделям OH^* в сравнении с результатами восстановления этой компоненты по данным измерений свечения $\text{O}(^1\text{S})$ прибором SCIAMACHY. Можно видеть, что модернизированная модель OH^* позволяет получить заметно лучше соответствие с данными SCIAMACHY.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показал, что новые параметры процедуры восстановления приводят к значительным (до 2 раз и более) изменениям в пространственных распределениях О, Н и скорости химического нагрева. Это происходит вследствие увеличения скоростей процессов $\text{OH}(9) + \text{O}_2 \rightarrow \text{OH}(0-8) + \text{O}_2$ и $\text{OH}(8) + \text{O}_2 \rightarrow \text{OH}(0-7) + \text{O}_2$ и уменьшения скоростей $\text{OH}(9) + \text{O} \rightarrow \text{OH}(0-8) + \text{O}$ и $\text{OH}(8) + \text{O} \rightarrow \text{OH}(0-7) + \text{O}$. Среднесезонные распределения О имеют максимумы,

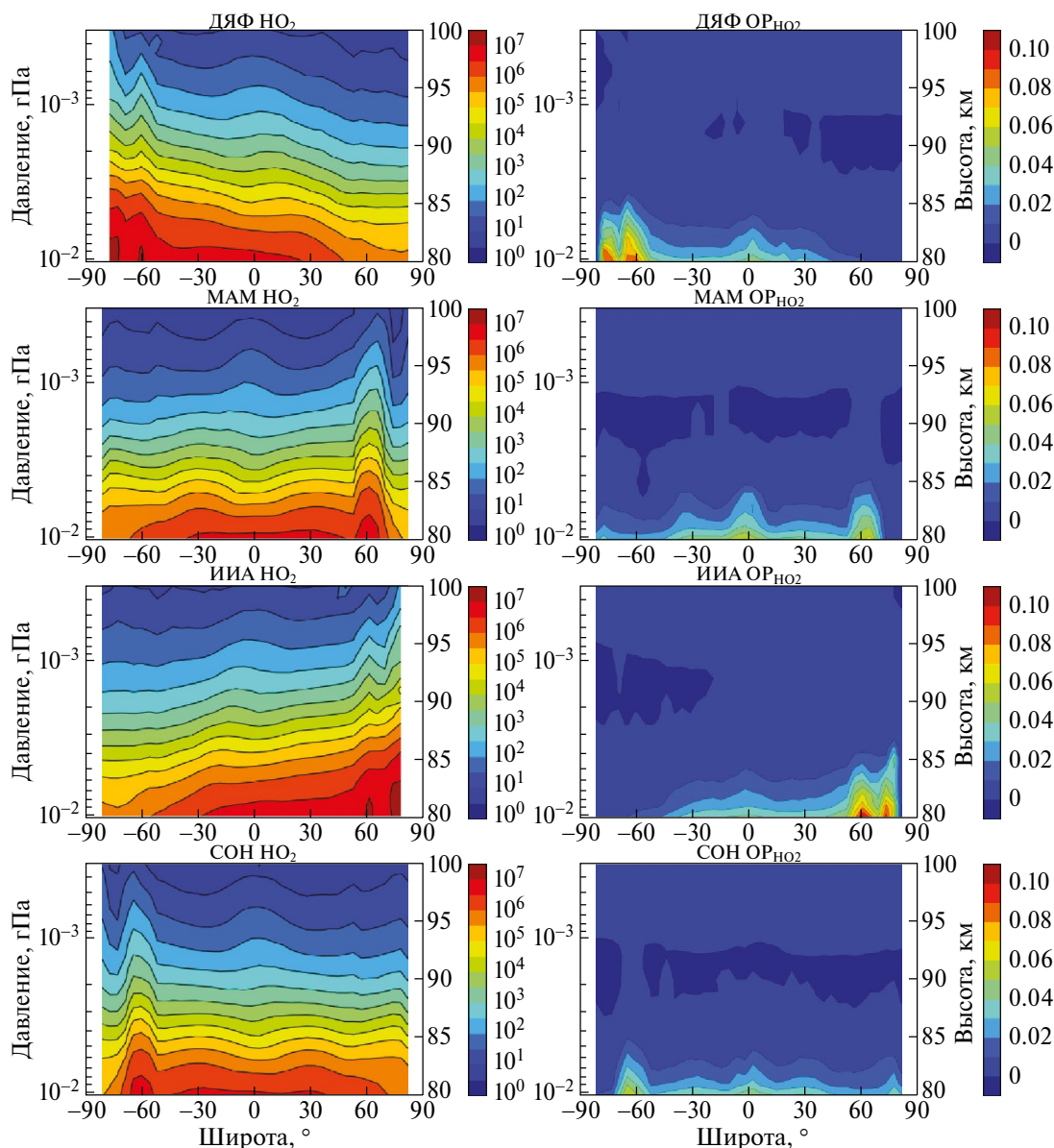


Рис. 4. Усредненные по долготе и времени (за каждый сезон 2002–2021 гг.) ночные распределения NO_2 (левая колонка, в см^{-3}) и OP_{NO_2} (правая колонка). 1 ряд – декабрь, январь, февраль, 2 ряд – март, апрель, май, 3 ряд – июнь, июль, август, 4 ряд – сентябрь, октябрь, ноябрь.

не превышающие $(5-6) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, что соответствует результатам работ [Panka et al., 2018, 2021; Zhu, Kaufmann, 2018, 2019]. Кроме того, данные O, полученные с помощью модернизированной модели OH*, заметно лучше соответствуют данным SCIAMACHY, чем в случае модели [Mlynczak et al., 2013a, 2018].

Восстановление распределений O и H и анализ полученных результатов выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-12-00064, <https://rscf.ru/project/22-12-00064/>. Восстановление распределений OH, HO₂ и скорости

химического нагрева выполнено за счет средств темы государственного задания в сфере науки (№ 0729-2020-0037).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Adler-Golden S.* Kinetic parameters for OH nightglow modeling consistent with recent laboratory measurements // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. № A9. P. 19969–19976.
- Belikov M.V., Kulikov M.Y., Grygalashvyly M., Sonnemann G.R., Ermakova T.S., Nechaev A.A., Feigin A.M.* Ozone chemical equilibrium in the extended mesopause under the nighttime conditions // Adv. Space Res. 2018. V. 61. № 1. P. 426–432.
- Caridade P.J.S.B., Horta J.-Z.J., Varandas A.J.C.* Implications

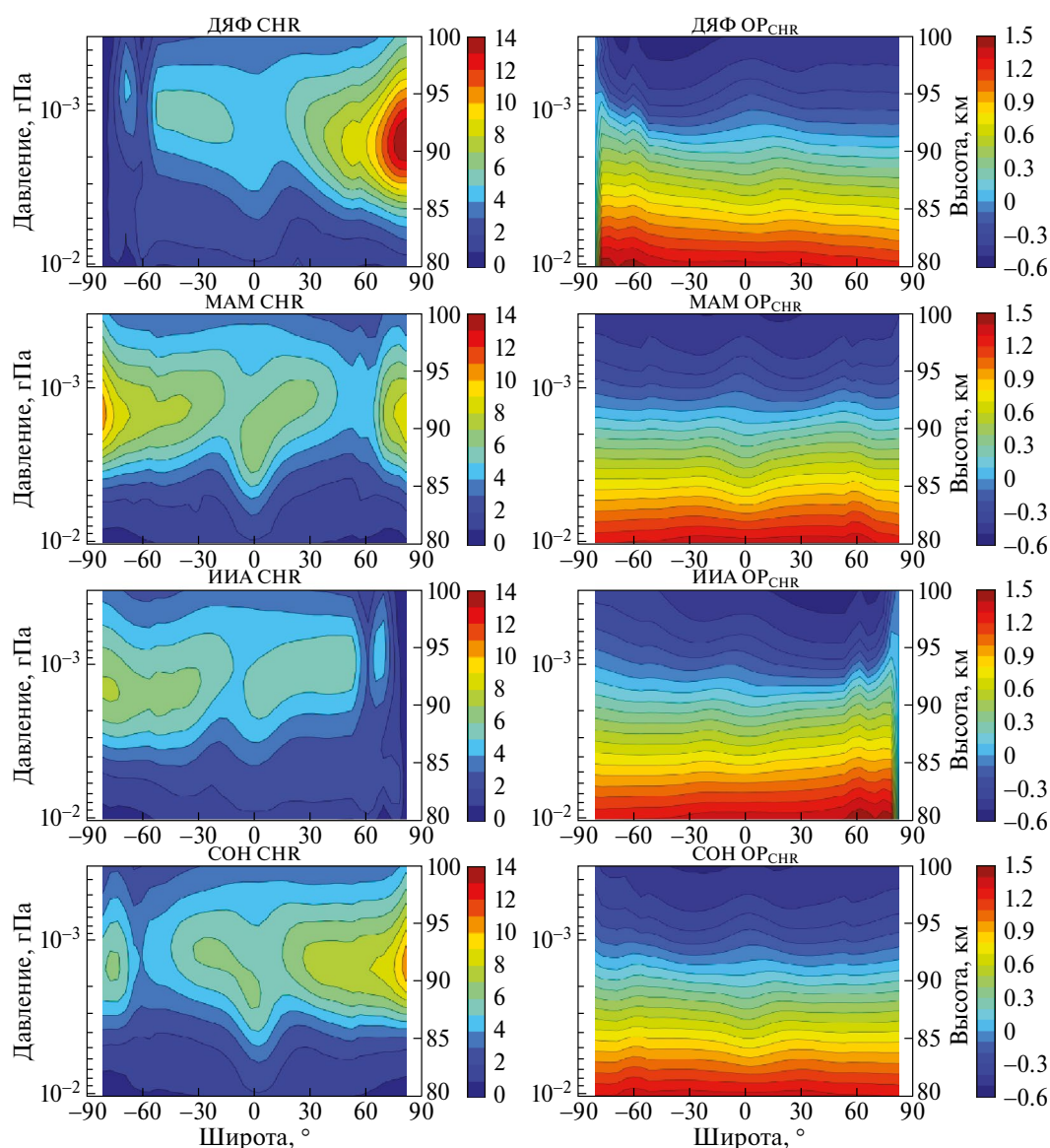


Рис. 5. Усредненные по долготе и времени (за каждый сезон 2002–2021 гг.) ночные распределения скорости химического нагрева воздуха СНR (левая колонка, в К/сут) и ОР_{СНR} (правая колонка). 1 ряд — декабрь, январь, февраль, 2 ряд — март, апрель, май, 3 ряд — июнь, июль, август, 4 ряд — сентябрь, октябрь, ноябрь.

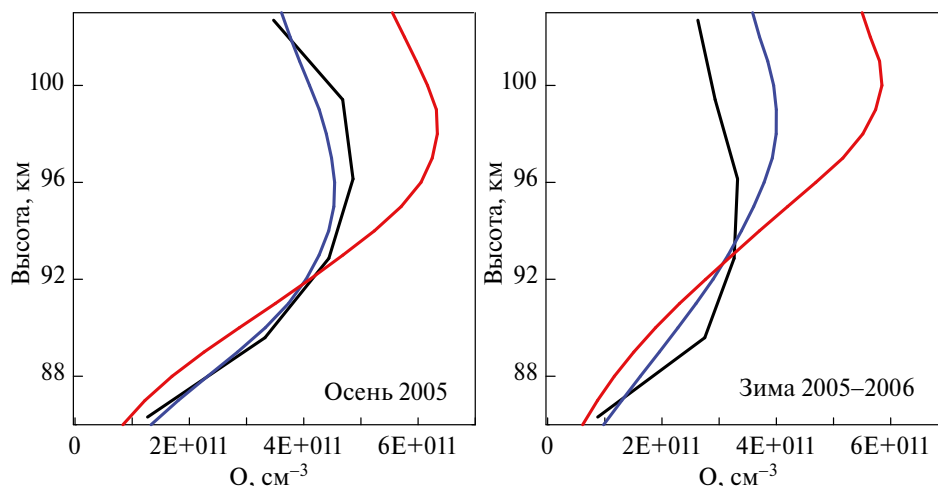


Рис. 6. Вертикальные профили O, усредненные в диапазоне 0–20°N за осень 2005 (левый) и зиму 2005–2006 гг. (правый) соответственно, отвечающие модернизированной модели OH* (синие линии) и модели [Mlynchzak et al., 2013a, 2018] (красные) в сравнение с результатами восстановления (черные линии) этой компоненты по данным измерений свечения O(¹S) прибором SCIAMACHY [Kaufmann et al., 2014].

- of the $O + OH$ reaction in hydroxyl nightglow modeling // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13. P. 1–13.
- Evans W.F.J., Llewellyn E.J. Atomic hydrogen concentrations in the mesosphere and the hydroxyl emissions // *J. Geophys. Res.* 1973. V. 78. P. 323–326.
- Evans W.F.J., McDade I.C., Yuen J., Llewellyn E.J. A rocket measurement of the O_2 infrared atmospheric (0–0) band emission in the dayglow and a determination of the mesospheric ozone and atomic oxygen densities // *Can. J. Phys.* 1988. V. 66. P. 941–946.
- Fytterer T., von Savigny C., Mlynchzak M., Sinnhuber M. Model results of OH airglow considering four different wavelength regions to derive night-time atomic oxygen and atomic hydrogen in the mesopause region // *Atmos. Chem. Phys.* 2019. V. 19. P. 1835–1851.
- Good R.E. Determination of atomic oxygen density from rocket borne measurements of hydroxyl airglow // *Planet. Space Sci.* 1976. V. 24. P. 389–395.
- Kalogerakis K.S., Matsiev D., Sharma R.D., Wintersteiner P.P. Resolving the mesospheric nighttime 4.3 μm emission puzzle: Laboratory demonstration of new mechanism for OH(ν) relaxation // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. P. 8835–8843.
- Kalogerakis K.S. A previously unrecognized source of the O_2 atmospheric band emission in earth's nightglow // *Science Advances*. 2019. V. 5. № 3. P. eaau9255.
- Kaufmann M., Zhu Y., Ern M., Riese M. Global distribution of atomic oxygen in the mesopause region as derived from SCIAMACHY O(¹S) green line measurements // *Geophys. Res. Lett.* 2014. V. 41. P. 6274–6280.
- Kulikov M.Y., Belikovich M.V., Grygalashvyly M., Sonnemann G.R., Ermakova T.S., Nechaev A.A., Feigin A.M. Daytime ozone loss term in the mesopause region // *Ann. Geophys.* 2017. V. 35. P. 677–682.
- Kulikov M.Y., Nechaev A.A., Belikovich M.V., Ermakova T.S., Feigin A.M. Technical note: Evaluation of the simultaneous measurements of mesospheric OH, HO_2 , and O_3 under a photochemical equilibrium assumption – a statistical approach // *Atmos. Chem. Phys.* 2018a. V. 18. P. 7453–7471.
- Kulikov M.Yu., Belikovich M.V., Grygalashvyly M., Sonnemann G. R., Ermakova T.S., Nechaev A.A., Feigin A.M. Nighttime ozone chemical equilibrium in the mesopause region // *J. Geophys. Res.* 2018b. V. 123. P. 3228–3242.
- Kulikov M.Yu., Nechaev A.A., Belikovich M.V., Vorobeva E.V., Grygalashvyly M., Sonnemann G.R., Feigin A.M. Boundary of nighttime ozone chemical equilibrium in the mesopause region from SABER data: Implications for derivation of atomic oxygen and atomic hydrogen // *Geophys. Res. Lett.* 2019. V. 46. № 2. P. 997–1004.
- Kulikov M.Y., Belikovich M.V., Grygalashvyly M., Sonnemann G.R., Feigin A.M. The revised method for retrieving daytime distributions of atomic oxygen and odd-hydrogens in the mesopause region from satellite observations // *Earth, Planets and Space*. 2022. V. 74. P. 44.
- Kulikov M.Yu., Belikovich M.V., Chubarov A.G., Dementeyeva S.O., Feigin A.M. Boundary of nighttime ozone chemical equilibrium in the mesopause region: improved criterion of determining the boundary from satellite data // *Adv. Space Res.* 2023. V. 71. № 6. P. 2770–2780.
- Llewellyn E.J., McDade I.C., Moorhouse P., Lockerbie M.D. Possible reference models for atomic oxygen in the terrestrial atmosphere // *Adv. Space Res.* 1993. V. 13. P. 135–144.

- Llewellyn E.J., McDade I.C.* A reference model for atomic oxygen in the terrestrial atmosphere // *Adv. Space Res.* 1996. V. 18. P. 209–226.
- Makhlouf U.B., Picard R.H., Winick J.R.* Photochemical-dynamical modeling of the measured response of airglow to gravity waves. 1. Basic model for OH airglow // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. P. 11289–11311.
- McDade I.C., Llewellyn E.J., Harris F.R.* Atomic oxygen concentrations in the lower auroral thermosphere // *Adv. Space Res.* 1985. V. 5. № 7. P. 229–232.
- McDade I.C., Llewellyn E.J.* Mesospheric oxygen atom densities inferred from night-time OH Meinel band emission rates // *Planet. Space Sci.* 1988. V. 36. P. 897–905.
- Mlynczak M.G., Marshall B.T., Martin-Torres F.J., Russell III J.M., Thompson R.E., Remsberg E.E., Gordley L.L.* Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry observations of daytime mesospheric $O_2(a^1\Delta_g)$ 1.27 μm emission and derivation of ozone, atomic oxygen, and solar and chemical energy deposition rates // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. P. D15306.
- Mlynczak M.G., Hunt L.A., Mast J.C., Marshall B.T., Russell III J.M., Smith A.K., Siskind D.E., Yee J.-H., Mertens C.J., Martin-Torres F.J., Thompson R.E., Drob D.P., Gordley L.L.* Atomic oxygen in the mesosphere and lower thermosphere derived from SABER: Algorithm theoretical basis and measurement uncertainty // *J. Geophys. Res.* 2013a. V. 118. P. 5724–5735.
- Mlynczak M.G., Hunt L.H., Mertens C.J., Marshall B.T., Russell III J.M., López-Puertas M., Smith A.K., Siskind D.E., Mast J.C., Thompson R.E., Gordley L.L.* Radiative and energetic constraints on the global annual mean atomic oxygen concentration in the mesopause region // *J. Geophys. Res.* 2013b. V. 118. P. 5796–5802.
- Mlynczak M.G., Hunt L.A., Marshall B.T., Mertens C.J., Marsh D.R., Smith A.K., Russell J.M., Siskind D.E., Gordley L.L.* Atomic hydrogen in the mesopause region derived from SABER: Algorithm theoretical basis, measurement uncertainty, and results // *J. Geophys. Res.* 2014. V. 119. P. 3516–3526.
- Mlynczak M.G., Hunt L.A., Russell J.M., Marshall B.T.* Updated SABER night atomic oxygen and implications for saber ozone and atomic hydrogen // *Geophys. Res. Lett.* 2018. V. 45. P. 5735–5741.
- Panka P.A., Kutepov A.A., Kalogerakis K.S., Janches D., Russell J.M., Rezac L., Feofilov A.G., Mlynczak M.G., Yigit E.* Resolving the mesospheric nighttime 4.3 μm emission puzzle: Comparison of the $CO_2(v_3)$ and OH(v) emission models // *Atm. Chem. Phys.* 2017. V. 17. P. 9751–9760.
- Panka P.A., Kutepov A.A., Rezac L., Kalogerakis K.S., Feofilov A.G., Marsh D., Janches D., Yigit E.* Atomic oxygen retrieved from the SABER 2.0- and 1.6- μm radiances using new first-principles nighttime OH(v) model // *Geophys. Res. Lett.* 2018. V. 45. P. 5798–5803.
- Panka P.A., Kutepov A.A., Zhu Y., Kaufmann M., Kalogerakis K.S., Rezac L., Feofilov A.G., Marsh D.R., Janches D.* Simultaneous retrievals of nighttime O(3P) and total OH densities from satellite observations of Meinel band emissions // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 48. P. e2020GL091053.
- Pendleton W.R., Baker K.D., Howlett L.C.* Rocket-based investigations of O(3P), $O_2(a^1\Delta_g)$ and OH* ($v = 1, 2$) during the solar eclipse of 26 February 1979 // *J. Atm. Terr. Phys.* 1983. V. 45. № 7. P. 479–491.
- Sharma R.D., Wintersteiner P.P., Kalogerakis K.S.* A new mechanism for OH vibrational relaxation leading to enhanced CO_2 emissions in the nocturnal mesosphere // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. P. 4639–4647.
- Siskind D.E., Marsh D.R., Mlynczak M.G., Martin-Torres F.J., Russell III J.M.* Decreases in atomic hydrogen over the summer pole: Evidence for dehydration from polar mesospheric clouds? // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. P. L13809.
- Siskind D.E., Mlynczak M.G., Marshall T., Friedrich M., Gumbel J.* Implications of odd oxygen observations by the TIMED/SABER instrument for lower D region ionospheric modeling // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2015. V. 124. P. 63–70.
- Smith A.K., Marsh D.R., Mlynczak M.G., Mast J.C.* Temporal variations of atomic oxygen in the upper mesosphere from SABER // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. P. D18309.
- Thomas R.J.* Atomic hydrogen and atomic oxygen density in the mesosphere region: Global and seasonal variations deduced from Solar Mesosphere Explorer near-infrared emissions // *J. Geophys. Res.* 1990. V. 95. P. 16457–16476.
- Xu J., Gao H., Smith A.K., Zhu Y.* Using TIMED/SABER nightglow observations to investigate hydroxyl emission mechanisms in the mesopause region // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. № D2. P. D02301.
- Zhu Y., Kaufmann M.* Atomic oxygen abundance retrieved from SCIAMACHY hydroxyl nightglow measurements // *Geophys. Res. Lett.* 2018. V. 45. P. 9314–9322.
- Zhu Y., Kaufmann M.* Consistent nighttime atomic oxygen concentrations from O_2 A-band, O(1S) green-Line, and OH airglow measurements as performed by SCIAMACHY // *Geophys. Res. Lett.* 2019. V. 46. P. 8536–8545.

Retrieval of Nighttime Distributions of Mesosphere—Lower Thermosphere Characteristics from Satellite Data

M. Yu. Kulikov^{1,2,*}, M. V. Belikov^{1,2}, A. G. Chubarov^{1,2}, S. O. Dementyeva¹, A. M. Feigin^{1,2}

¹*Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Ulyanova str., 46, 603950 Russia*

²*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Gagarina prosp., 23, Nizhny Novgorod, 603022 Russia*

**e-mail: kulm@ipfran.ru*

The database of SABER/TIMED satellite campaign includes the distributions of nighttime O, H and some other characteristics of mesosphere — lower thermosphere region which are retrieved from the measurements of OH* volume emission rate (near 2 μm), temperature and ozone. In the core of the retrieval procedure lies the assumption about photochemical equilibrium of nighttime ozone and airglow model that considers two excited states of OH (levels $v = 9, 8$). In this work, a modified OH* model (with the rate constants updated according to contemporary publications) is used to retrieve O, H, OH, HO₂ and the chemical heating rate at 80–100 km altitudes from SABER/TIMED measurements in 2002–2021. It was found that the use of new parameters in the retrieval procedure leads to significant (up to 2 times or more) changes in the resulting spatial distributions of O, H and chemical heating rate, while the corresponding changes in OH and HO₂ distributions are minor.

Keywords: mesosphere—lower thermosphere, ozone, atomic oxygen, excited hydroxyl, satellite measurements