

УДК 510.534,551.509.313.41

## ОПЫТНЫЕ ГЛОБАЛЬНЫЕ ПРОГНОЗЫ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ, УЧИТЫВАЮЩЕЙ ФОТОХИМИЮ ОЗОНА (МОДЕЛЬ FOROZ)

© 2020 г. А. А. Криволицкий<sup>1, \*</sup>, Т. Ю. Вьюшкова<sup>1</sup>, М. В. Банин<sup>1</sup>, М. А. Толстых<sup>2, 3</sup>

<sup>1</sup>Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета (ЦАО),  
г. Долгопрудный (Московская обл.), Россия

<sup>2</sup>Гидрометцентр РФ, г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт вычислительной математики  
им. Г.И. Марчука РАН (ИВМ РАН), г. Москва, Россия

\*e-mail: alexei.krivolutsky@rambler.ru

Поступила в редакцию 12.07.2019 г.

После доработки 30.08.2019 г.

Принята к публикации 26.09.2019 г.

Представлены результаты численных сезонных прогнозов температуры, рассчитываемых с помощью двух интерактивно работающих численных глобальных моделей: фотохимической модели ЦАО SHARM (0–90 км) и модели сезонного прогноза ГМЦ/ИВМ РАН ПЛАВ (0–30 км). Выше 30 км было проведено сшивание полей ветра и температуры с использованием модели общей циркуляции ЦАО ARM. Проведено сравнение результатов прогноза с данными реанализа. В результате проведенных расчетов показано, что новая объединенная модель FOROZ (Forecast with Ozone) показала устойчивость при реализации численных сценариев. Сезонные прогностические поля температуры модели ПЛАВ и объединенной модели FOROZ с данными реанализа близки в нижней тропосфере и отличаются в стратосфере. Объединенная модель FOROZ улучшает прогноз температуры в верхней тропосфере и стратосфере.

DOI: 10.31857/S0016794020010083

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В задачах среднесрочного и долгосрочного прогноза погоды (на месяц и сезон) одним из факторов влияния на качество прогноза, возможно, является интерактивное прогнозирование радиационно-активных газов, содержание которых включено в радиационные блоки модели. Одной из таких атмосферных примесей является озон, который, как известно, практически полностью поглощает солнечную ультрафиолетовую радиацию, разогревая в первую очередь стратосферу и определяя циркуляцию и температуру на этих высотах.

В настоящей работе была поставлена задача создания технологии прогноза, которая бы включала интерактивный расчет озона. Для решения этой задачи было реализовано объединение модели прогноза Гидрометцентра/ИВМ РАН ПЛАВ [Толстых, 2010] и трехмерной глобальной фотохимической модели SHARM [Криволицкий и др., 2015а], созданной в лаборатории химии и динамики атмосферы ЦАО. Модели работают в интерактивном режиме. Поскольку диапазон вы-

сот модели SHARM 0–90 км, а модели ПЛАВ 0–30 км, было принято решение осуществлять интерактивное взаимодействие фотохимической модели до высоты 30 км, а выше использовать предварительные расчеты (на каждый день года) температуры и ветра с помощью модели общей циркуляции ЦАО ARM [Криволицкий и др., 2015б].

Реализованы пробные прогнозы на летний и зимний сезоны. В настоящей работе представлены полученные результаты, а также результаты сравнения прогностических полей температуры с соответствующими данными реанализа.

### 2. ОПИСАНИЕ ОБЪЕДИНЕННОЙ МОДЕЛИ

Объединенная модель FOROZ (Forecast with Ozone) является комплексом моделей, обеспечивающих расчет озона в диапазоне высот 0–90 км с помощью моделей SHARM, ARM и ПЛАВ. Модель ARM позволяет реализовать полноценные расчеты озона выше верхней границы модели ПЛАВ. Кратко напомним основные параметры и принципы работы моделей.

### 2.1. Модель CHARM

При интегрировании системы уравнений химической кинетики модели, которая относится к так называемым “жестким системам”, был использован метод “химических семейств”, предложенный в свое время работе [Turco and Whitten, 1974]. “Жесткость” систем уравнений химической кинетики проявляется в данном случае в большом диапазоне значений характерных “времен жизни” химических компонентов (от долей секунды до сотен лет), что потребовало бы очень малых временных шагов интегрирования. Метод “семейств” позволяет в значительной степени снять “жесткость” системы и значительно увеличить временной шаг. Фотохимический блок модели описывает взаимодействие между 45 химическими составляющими, участвующими в 127 фотохимических реакциях.

В модели рассчитывались следующие составляющие:

– входящие в химические “семейства”

$O_x = O_3 + O(^3P) + O(^1D)$ ;  $NO_y = N + NO + NO_2 + NO_3 + 2N_2O_5 + HNO_3 + HO_2NO_2 + ClNO_3 + N(^2D)$ ;  $Cl_y = Cl + ClO + OClO + ClOO + HOCl + HCl$ ;  $HO_x = H + OH + HO_2 + 2H_2O_2$ ;  $CH_3$ ,  $CH_2O$ ,  $CH_3O_2$ ,  $CH_3O_2H$ ,  $CH_3O$ ,  $CHO$ ,  $CO$ ;

– газы-источники вышеперечисленных компонентов:

$CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $N_2O$ ,  $CF_2Cl_2$ ,  $CFCl_3$ ,  $H_2$ ,  $Cl_4$ ,  $Cl_2$ ,  $CH_3Cl$ ,  $CH_2Cl$ ,  $O_2$  (профиль фиксирован),  $N_2$  (профиль фиксирован),  $M = O_2 + N_2$  (концентрация молекул воздуха),  $H_2O$  (глобальное распределение фиксировано).

Вертикальный профиль молекулярного кислорода в расчетах был зафиксирован. Глобальное (двумерное) распределение водяного пара, основанное на наблюдениях со спутника UARS (прибор HALOE), также не менялось.

Шаг интегрирования модели по времени варьировался от 100 до 500 с. Скорости диссоциации пересчитывались через 1 ч модельного времени, что позволило корректно описать суточный ход солнечной радиации над фиксированной точкой. Нижняя граница модели находится на уровне земли, верхняя – на высоте 88 км, шаг по высоте в модели составляет 2 км, разрешение по широте –  $5^\circ$ , по долготе –  $10^\circ$ . Начальные распределения всех малых газовых составляющих (МГС) брались из одномерной фотохимической модели [Krivolutsky et al., 2005]. При описании химии тропосферы были учтены, в параметрическом виде, процессы “вымывания” в облаках для некоторых компонентов ( $H_2O_2$ ,  $HNO_3$ ,  $HCl$ ,  $HNO_4$ ).

Гетерогенные реакции на поверхности аэрозольных частиц не учитывались. Глобальные по-

ля компонент ветра и температуры, используемые в модели, были получены из предварительных расчетов по модели общей циркуляции ARM (она описана ниже). Была использована схема адвективного переноса химически активной примеси (схема Пратера), предложенная в работе [Prather, 1986]. При этом использовались соответствующие трехмерные поля, осредненные за сутки для каждого дня года.

### 2.2. Модель общей циркуляции ARM

Модель является развитием одной из версий, разработанных в Институте метеорологии Университета г. Кельн, Германия (COMMA [Jacobs et al., 1986; Ebel et al., 1992]). Данная версия модели (ARM) содержит более совершенные радиационные блоки (параметризации), учитывающие в частности перенос радиации с учетом облачности и аэрозоля, а также имеет более детальное пространственное разрешение.

В модели ARM шаг высотного разрешения составляет 1 км, нижняя граница расположена на высоте  $\sim 1$  км. Шаг по широте в интервале  $87.5^\circ S - 87.5^\circ N$  составляет  $5^\circ$ , шаг по долготе –  $11.25^\circ$ . Верхний уровень модели лежит на высоте 135 км.

Модель основана на системе “примитивных” уравнений, записанных в сферических координатах (по вертикали используется лог-изобарическая высота):

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{a \cos \vartheta} \frac{\partial(u^2)}{\partial \varphi} - \frac{1}{a \cos \vartheta} \frac{\partial}{\partial \vartheta} (uv \cos \vartheta) - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} (\rho_0 u w) + \left(f + \frac{u}{a} \operatorname{tg} \vartheta\right) v - \frac{1}{a \cos \vartheta} \frac{\partial \Phi}{\partial \varphi} - \Lambda_{\varphi\varphi} u + F_u^M + F_u^D + G_u, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{a \cos \vartheta} \frac{\partial uv}{\partial \varphi} - \frac{1}{a \cos \vartheta} \frac{\partial}{\partial \vartheta} (v^2 \cos \vartheta) - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} (\rho_0 v w) - \left(f + \frac{u}{a} \operatorname{tg} \vartheta\right) u - \frac{1}{a} \frac{\partial \Phi}{\partial \vartheta} - \Lambda_{\vartheta\vartheta} v + F_v^M + F_v^D + G_v, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{a \cos \vartheta} \frac{\partial u T}{\partial \varphi} - \frac{1}{a \cos \vartheta} \frac{\partial}{\partial \vartheta} (v T \cos \vartheta) - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} (\rho_0 w T) - \frac{R}{m' c_p H} w T - \alpha(T - T_0) + F_T^M + F_T^D + Q_i + G_T, \quad (3)$$

$$\frac{1}{a \cos \vartheta} \frac{\partial}{\partial \vartheta} (v \cos \vartheta) + \frac{1}{a \cos \vartheta} \frac{\partial u}{\partial \varphi} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} (\rho_0 w) = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{RT}{m' H}, \quad (5)$$

где  $u$  – зональная скорость ветра (положительная на восток);  $v$  – меридиональная скорость ветра (положительная на север);  $T$  – температура;  $w = \frac{dz}{dt}$  – вертикальная скорость (положительная вверх);  $\Phi$  – геопотенциал;  $\vartheta$  – широта;  $\varphi$  – долгота;  $z = H \ln(p_0/p)$ ;  $f$  – параметр Кориолиса;  $H = 7$  км (высота однородной атмосферы);  $M$  – молекулярный вес воздуха;  $M_0$  – молекулярный вес воздуха на фиксированной поверхности;  $m' = M/M_0$ ,  $p$  – давление;  $p_0$  – давление на фиксированной поверхности;  $a$  – радиус Земли;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T_0$  – температура основного состояния, зависящая только от высоты и широты;  $\alpha$  – коэффициент ньютоновского выхолаживания;  $\Lambda_{mn}$  – тензор ионного трения;  $\mu$  – динамическая вязкость;  $\rho_0$  – плотность основного состояния, зависящая только от высоты;  $D$  – коэффициент турбулентной диффузии;  $Q_i$  – источники и стоки тепла;  $F_u, F$  – широтные и долготные компоненты действующих сил;  $G_u, G_v$  – вклад гравитационных волн в изменение скоростей ветра  $u$  и  $v$ ;  $G_T$  – вклад гравитационных волн в изменение температуры  $T$ .

Система уравнений (1)–(5) решается явным методом с фиксированным временным шагом 112.5 с. Для предотвращения нелинейной неустойчивости за счет накопления энергии на малых (подсеточных) масштабах в модели применяется численная фильтрация.

Входными параметрами для схемы учета воздействия внутренних гравитационных волн в модели [Криволицкий и др., 2015а, б] являются:  $l = 200$  км – горизонтальная длина волны, верти-

кальные скорости на нижней границе для трех волн  $W = 0.15$  м/с,  $0.02$  м/с,  $0.02$  м/с. Фазовые скорости равны  $0$  м/с,  $30$  м/с,  $60$  м/с, азимуты равны  $0^\circ, 45^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 315^\circ$ . С учетом приведенных параметров в схему включено 18 волн. В основе лежит параметризация, предложенная в работе [Lindzen, 1981].

На нижней границе модели закладывалась суперпозиция стационарных волн на основе наблюдений с волновыми числами  $s = 1, 2, 3$  с учетом их сезонного хода.

В радиационных блоках модели ARM ниже высоты 60 км была использована параметризация выхолаживания в инфракрасной области [Голстых, 2010], позволяющая не только менять содержание углекислого газа в атмосфере, но и учитывать влияние облачности и аэрозоля (при заданном балле облачности и параметрах аэрозольных частиц). Выше высоты 60 км использовалась параметризация выхолаживания  $\text{CO}_2$ , учитывающая отклонение от локального термодинамического равновесия [Chou and Suarez, 1994], что важно при расчетах температуры в верхней стратосфере, мезосфере и нижней термосфере.

Нагрев средней атмосферы, который учитывается в модели, происходит при поглощении солнечной радиации озоном в полосах Шаппюи, Хеггинса и Хартли и молекулярным кислородом в полосах Шумана–Рунге и в континууме Шумана–Рунге. Ниже приводятся используемые параметризации скоростей нагрева (К/с) в соответствующих участках спектра:

---

полосы Шаппюи:	$Q_{\text{Ch}}/n(\text{O}_3) = 1.05 \times 10^{-15} \exp(-2.85 \times 10^{-21} N_3),$
полосы Хеггинса:	$Q_{\text{Hu}}/n(\text{O}_3) = 1/N_3 \{ 4.66 \times 10^3 - 7.8 \times 10^2 \exp(-1.77 \times 10^{-19} N_3) - 3.88 \times 10^3 \exp(-4.22 \times 10^{-18} N_3) \},$
полосы Хартли:	$Q_{\text{Ha}}/n(\text{O}_3) = 4.8 \times 10^{-14} \exp(-8.8 \times 10^{-18} N_3),$
полосы Шумана–Рунге:	$Q_{\text{SRB}}/n(\text{O}_2) = 1/(0.67 N_2 + 3.44 \times 10^9 N_2^{1/2}), \quad N_2 > 10^{18} \text{ см}^{-2},$
полосы Шумана–Рунге:	$Q_{\text{SRB}}/n(\text{O}_2) = 2.43 \times 10^{-19}, \quad N_2 < 10^{18} \text{ см}^{-2},$
континуум Шумана–Рунге:	$Q_{\text{SRC}}/n(\text{O}_2) = 1/N_2 \{ 0.98 \exp(-2.9 \times 10^{-19} N_2) - 0.55 \exp(-1.7 \times 10^{-18} N_2) - 0.43 \exp(-1.15 \times 10^{-17} N_2) \},$

---

где  $n(\text{O}_3), n(\text{O}_2)$  – плотности числа частиц озона и молекулярного кислорода,

$$N_2 = \int_z^\infty n(\text{O}_2) dz / \cos \chi, \quad N_3 = \int_z^\infty n(\text{O}_3) dz / \cos \chi,$$

$\chi$  – зенитный угол Солнца.

Было проведено сравнение результатов численного моделирования (среднемесячные данные) со стандартной атмосферой CIRA-86. Модель достаточно хорошо воспроизводит глобальное среднезональное температурное поле, включая холодную летнюю мезосферу.

Полное описание модели можно найти в работе [Fomichev et al., 1998].

### 2.3. Модель ПЛАВ

Как было сказано выше, интерактивная модель прогноза представляет собой взаимодействие модели Гидрометцентра/РАН ПЛАВ и трехмерной фотохимической модели CHARМ.

Модель ПЛАВ – полулагранжева модель численного прогноза, предназначенная для расчета долгосрочных (сезонных) прогнозов [Толстых, 2010]. Сущность полулагранжева метода состоит в дискретизации уравнения переноса вдоль траекторий, и, таким образом, они являются комбинацией дифференцирования по пространству и времени. Конечные точки траекторий являются узлами сетки. Модель ПЛАВ была внедрена в оперативную практику в начале 2010 г. В модели используется редуцированная широтно-долготная сетка. Предел модели по высоте – 30 км. Горизонтальное разрешение модели по долготе и широте –  $0.9^\circ$  и  $0.72^\circ$ . Число уровней модели по вертикали – 28. Исходный код модели выполнен на языке FORTRAN, имеются блоки распараллеливания вычислений для повышения производительности расчетов (с использованием библиотеки MPI). В модели учитываются следующие процессы: происходящие на поверхности земли (тепло- и влагообмен), коротко- и длинноволновая радиация, глубокая и мелкая конвекция, торможение гравитационных волн. Модель разработана для мощных суперкомпьютеров под управлением OS UNIX, для компиляции исходного кода модели используется Intel Fortran. Модель ПЛАВ была установлена и апробирована в Лаборатории химии и динамики атмосферы (ЛХДА) ЦАО. Для начала работы с моделью в ЦАО был установлен пакет Intel Fortran, т.к. модель не может быть корректно собрана при помощи обычного GNU Fortran. Исходный код модели был получен из ГМЦ и перекомпилирован под операционную систему Fedora (RedHat) 64-bit linux, установленную на обычный 4-ядерный компьютер с 8 ГБ ОЗУ. Хотя некоторые блоки модели были получены в закрытом, уже скомпилированном виде, в виде библиотек. Модель была корректно собрана при помощи Intel Fortran и заработала на обычной 64-разрядной intel-архитектуре. Вместе с моделью были получены начальные данные для проведения тестовых расчетов, а также данные для верификации результирующего прогноза.

Следующим этапом работ явилось осуществление интерактивного режима двух моделей. Этот этап занял большую часть времени. Удалось добиться устойчивой работы фактически новой мо-

дели в 4 квартале 2013 г. Первым шагом к объединению моделей была реализация устойчивой работы модели CHARМ в среде модели ПЛАВ (но без взаимодействия). Затем была реализована передача полей озона (один раз за модельные сутки) в модель ПЛАВ. И, наконец, был реализован полноценный обмен: в модель ПЛАВ передавались трехмерные поля озона, а в модель CHARМ глобальные поля компонент скорости ветра и глобальные поля температуры. Различие сеток моделей (CHARМ имеет более грубую сетку) преодолевалось интерполяцией.

Различие в вертикальных координатах (сигма-координаты в модели ПЛАВ и геометрическая высота в модели CHARМ) также преодолевалось интерполяцией. Вертикальные скорости пересчитывались при переходе от сигма-координат к геометрическим по известным формулам.

Инициализация фотохимической модели CHARМ заключалась в получении “химического климата” для всех малых газовых компонентов модели (включая озон), т.е. в получении их трехмерных глобальных распределений в узлах сетки на каждый день года. Таким образом, эти поля можно использовать в качестве начальных при реализации прогнозов.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГНОЗОВ НА ЛЕТНИЙ И ЗИМНИЙ СЕЗОНЫ

В рамках выполнения численных экспериментов были реализованы численные прогнозы с помощью модели ПЛАВ и объединенной модели FOROZ для зимнего и летнего (условно) сценариев. Были использованы начальные данные на 1999 г. Были выполнены трехмесячные прогнозы по обоим моделям. Соответствующие последние месяцы прогонов моделей при реализации сценариев были апрель и октябрь. Предварительно были проведены расчеты по фотохимической модели для инициализации трехмерных полей озона на каждый месяц года, что, таким образом, позволяет использовать эту базу данных при реализации других сценариев.

Сравнение моделей в поле температуры представлено в приведенной ниже табл. 1. Для каждого высотного уровня модели ПЛАВ в таблице представлена средняя разность между расчетами по двум моделям по глобальному полю в узлах сетки. В первом столбце пронумерованы 28 уровней по высоте модели ПЛАВ.

Из таблицы видно, что разница между исходной моделью ПЛАВ и объединенной моделью FOROZ уменьшается с высотой по мере удаления от места “склейки” моделей. Высоты в км, на которых было проведено сравнение с данными ре-

**Таблица 1.** Сравнение моделей FOROZ и ПЛАВ в поле температуры на всех высотах

Уровни модели ПЛАВ	Высота/давление, мбар		Апрель 1999 г.		Октябрь 1999 г.	
			средняя разность	стандартное отклонение	средняя разность	стандартное отклонение
1		9	-6.3	2.6	-7.51	1.77
2		19	-6.27	2.49	-9.41	1.73
3		32	-2.11	2.56	-6.58	3.22
4	~20 км	49	3.1	3.24	-1.53	4.27
5	~18 км	70	5.71	2.96	2.26	3.66
6		94	5.72	2.75	3.82	2.51
7		120	4.9	2.83	4.08	2.16
8	~14 км	150	3.82	2.59	3.67	2.09
9		184	2.65	2.1	2.88	1.80
10		223	1.6	1.61	1.98	1.35
11		269	0.86	1.32	1.23	1.16
12	~10 км	320	0.48	1.36	0.80	1.33
13		375	0.29	1.59	0.58	1.51
14		432	0.21	1.78	0.51	1.60
15	~5 км	491	0.19	1.89	0.47	1.65
16		550	0.18	1.96	0.46	1.69
17		610	0.17	2.01	0.43	1.74
18		669	0.12	2.05	0.40	1.75
19	~3 км	725	0.05	2.08	0.38	1.76
20		778	0.01	2.11	0.36	1.75
21		825	-0.03	2.14	0.36	1.74
22	~1.5 км	866	-0.06	2.14	0.38	1.73
23		901	-0.07	2.1	0.39	1.70
24		931	-0.06	2.04	0.35	1.65
25		955	-0.05	1.94	0.33	1.52
26		974	-0.05	1.79	0.31	1.40
27		990	-0.05	1.69	0.31	1.36
28		1000	-0.05	1.69	0.31	1.36

анализа NCEP, приведены во втором столбце слева (приведено ниже).

Был также реализован очень ограниченный набор сценариев ансамблевых прогнозов, результаты которых практически не изменили полученных выше оценок (поэтому не приводятся).

Важным моментом при оценке итогов выполненной работы было понимание того, стал ли прогноз лучше (или хуже) после объединения моделей. С этой целью было проведено сравнение результатов прогнозов с данными реанализа. Результаты сравнения, а также сами результаты прогноза приведены на рисунках.

#### 4. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОГНОЗОВ ПО МОДЕЛИ FOROZ НА ЛЕТНИЙ И ЗИМНИЙ СЕЗОНЫ 1999 г. С ДАННЫМИ РЕАНАЛИЗА

Для сравнения модельных результатов с эмпирическими данными был использован банк данных реанализа "NCEP Daily Global Analyses". На рисунке 1 приведен пример поля температуры из базы данных реанализа на уровне 1000 мбар с очертаниями материков. Картинка, как это будет видно ниже, полезна при анализе данных модельных расчетов, в первую очередь для качественной визуализации орографических эффектов.

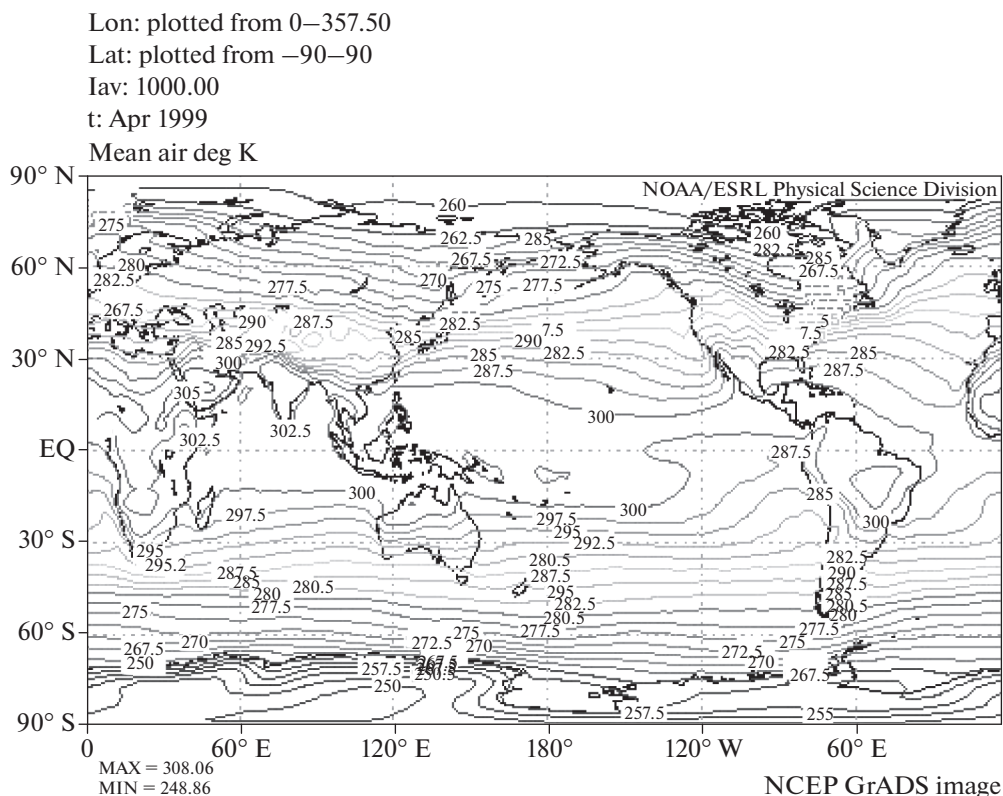


Рис. 1. Поле температуры для апреля 1999 г. на высоте 1000 мбар.

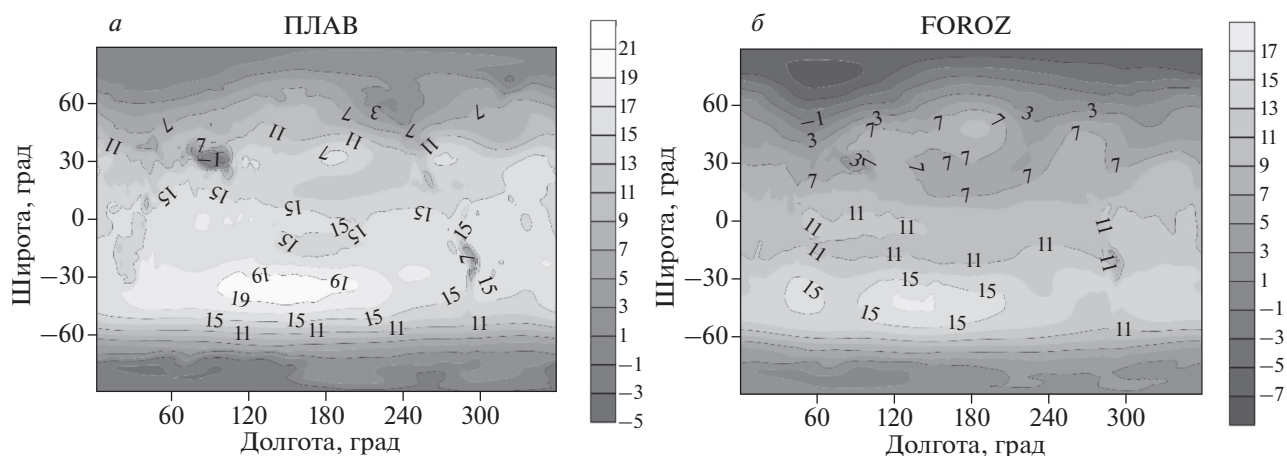
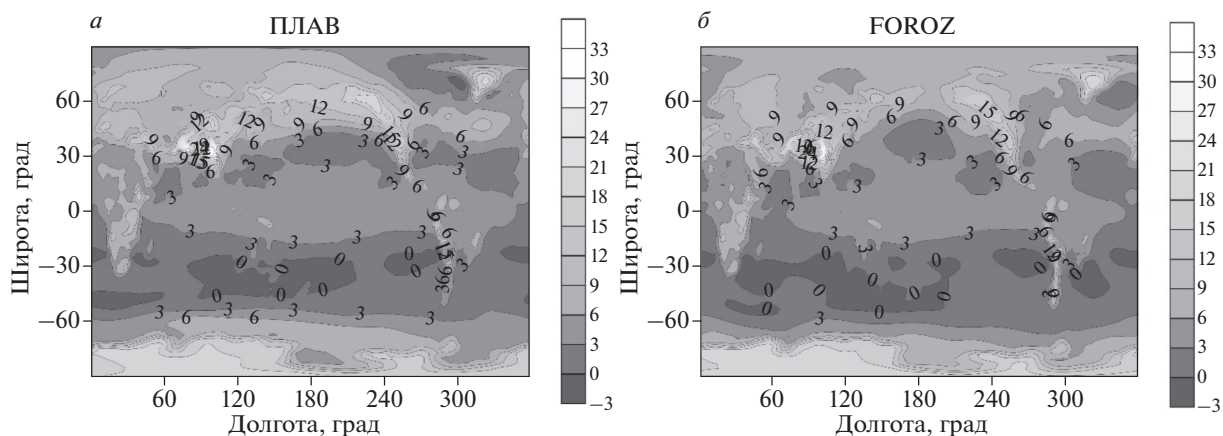


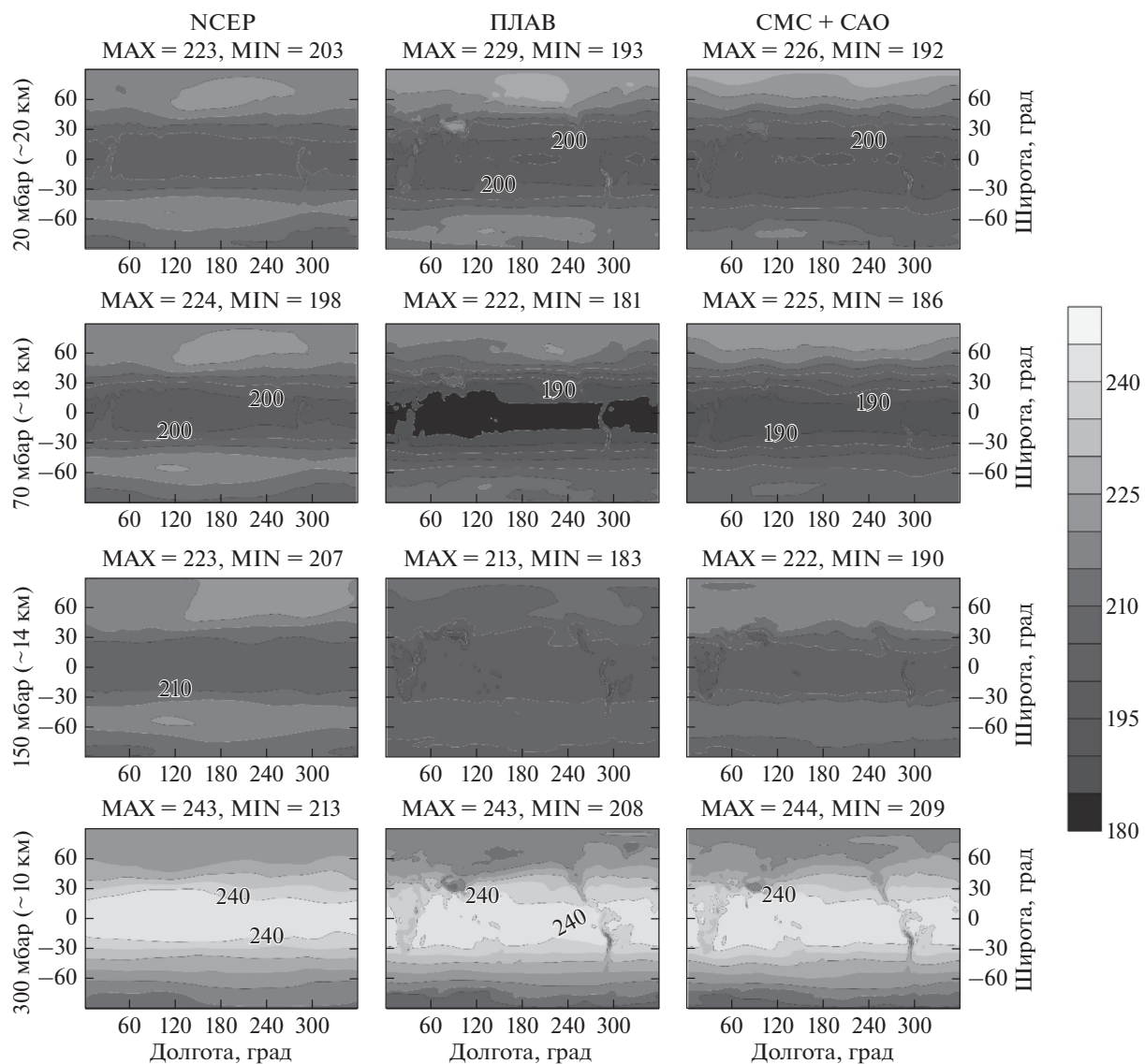
Рис. 2. Разность между данными реанализа NCEP и результатами прогнозов моделей по среднемесячным полям температуры для апреля 1999 г. на высоте 18 км. (а) – разность данных NCEP с прогнозом по модели ПЛАВ: минимум – 5 К, максимум – 20.6 К, среднее отклонение прогноза от данных NCEP – 9.7 К, среднеквадратичное отклонение – 6.5 К; (б) – разность с прогнозом по модели FОRОZ: минимум – 8.2 К, максимум – 17.4 К, среднее отклонение – 6.5 К, среднеквадратичное отклонение – 6.1 К.

На рисунке 2 приведена разность среднемесячных полей в стратосфере (18 км) для апреля 1999 г. между данными реанализа NCEP и модельными прогнозами. Разность вычислена в узлах сетки поля NCEP, которое имеет разрешение  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  по горизонтали. Рисунок 2а представ-

ляет разность с моделью ПЛАВ, рис. 2б – с моделью FОRОZ. Видно, что различие достаточно велико, среднее отклонение прогнозов по моделям от данных реанализа составляет 6.5 К. Среднеквадратичное отклонение от данных реанализа для моделей ПЛАВ и FОRОZ составляет 6.5 К и



**Рис. 3.** Разность между данными реанализа NCEP и результатами сезонных прогнозов моделей по среднемесячным полям температуры для апреля 1999 г. на высоте 5 км. (а) – разность данных NCEP с прогнозом по модели ПЛАВ: минимум – 2.4 К, максимум – 35 К, среднее отклонение прогноза от данных NCEP – 6 К, среднеквадратичное отклонение – 5.1 К; (б) – разность с прогнозом по модели FOROZ: минимум – 2.4 К, максимум – 32.5 К, среднее отклонение – 5.8 К, среднеквадратичное отклонение – 5.3 К.



**Рис. 4.** Глобальные поля температуры на высотах 10, 14, 18 и 20 км для апреля 1999 г. по данным реанализа NCEP и трехмесячным прогнозам моделей ПЛАВ и FOROZ.



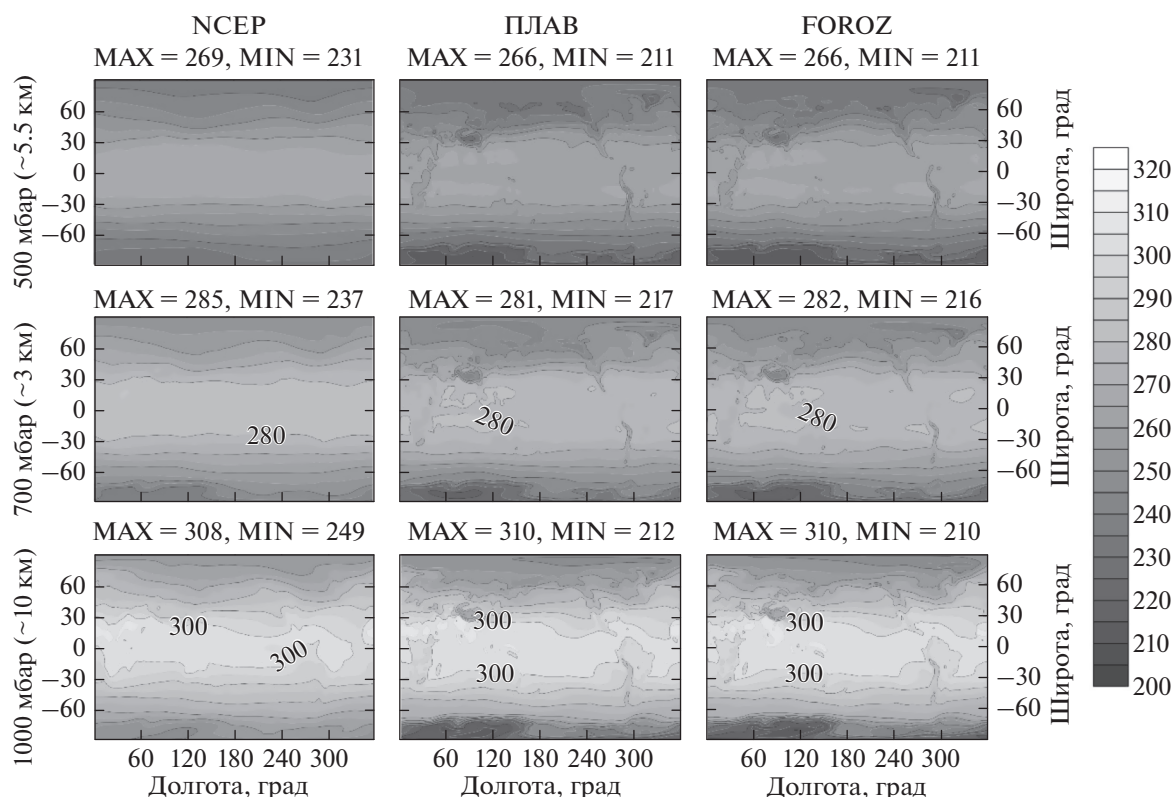


Рис. 5. Глобальные поля температуры на высотах 0, 3, и 5.5 км для апреля 1999 г. по данным реанализа NCEP и трехмесячным прогнозам моделей ПЛАВ и FOROZ.

6.1 К соответственно. Таким образом, прогноз объединенной модели FOROZ несколько лучше воспроизводит поле температуры реанализа.

Аналогично на рис. 3 представлено различие модельных прогнозов с данными реанализа в тропосфере на высоте 5 км для апреля 1999 г. В тропосфере отклонение модельных полей от данных реанализа меньше. Среднее отклонение для модели ПЛАВ составляет 6 К, для модели FOROZ — 5.8 К. Основные различия приходятся на области с развитой орографией.

На рисунке 4 изображены глобальные поля температуры для апреля 1999 г. по данным реанализа и трехмесячным модельным прогнозам. На нижнем рисунке (уровень 10 км) видно достаточно хорошее соответствие полей, однако видно также, что существующие возмущения температуры в модельных прогнозах в областях заметной орографии отсутствуют в данных реанализа NCEP. Этот вопрос требует специального рассмотрения.

На рисунке 5 представлены поля температуры для нижних уровней тропосферы (0 км, 3 км и 5.5 км) для апреля 1999 г., взятые из банка данных реанализа NCEP и полученные по результатам трехмесячных прогнозов с помощью модели

ПЛАВ и объединенной модели FOROZ. Представляется, что модели в целом достаточно хорошо воспроизводят глобальное поле температуры по данным реанализа в тропосфере.

Ниже представлено аналогичное сравнение результатов трехмесячных прогнозов с последним месяцем в октябре (август–сентябрь–октябрь, условно “летний” прогноз) с данными реанализа для октября 1999 г.

На рисунках 6 и 7 показаны глобальные поля температуры на высотах 0, 1.5, 3, 5.5, 10, 14, 18 и 20 км для октября 1999 г. по данным реанализа и трехмесячным прогнозам моделей ПЛАВ и FOROZ. Рисунки показывают в целом неплохое визуальное соответствие за исключением уровня 70 мбар (18 км), где модельные расчеты дают заметно более низкие значения температуры в низких широтах, чем данные реанализа.

На рисунке 8 представлена рассчитанная на основе температурных данных реанализа и трехмесячных прогнозов по модели ПЛАВ и объединенной модели FOROZ глобальная невязка для апреля 1999 г.

Видно, что объединенная модель дает меньшую невязку в стратосфере. В тропосфере различие между моделями практически отсутствует.



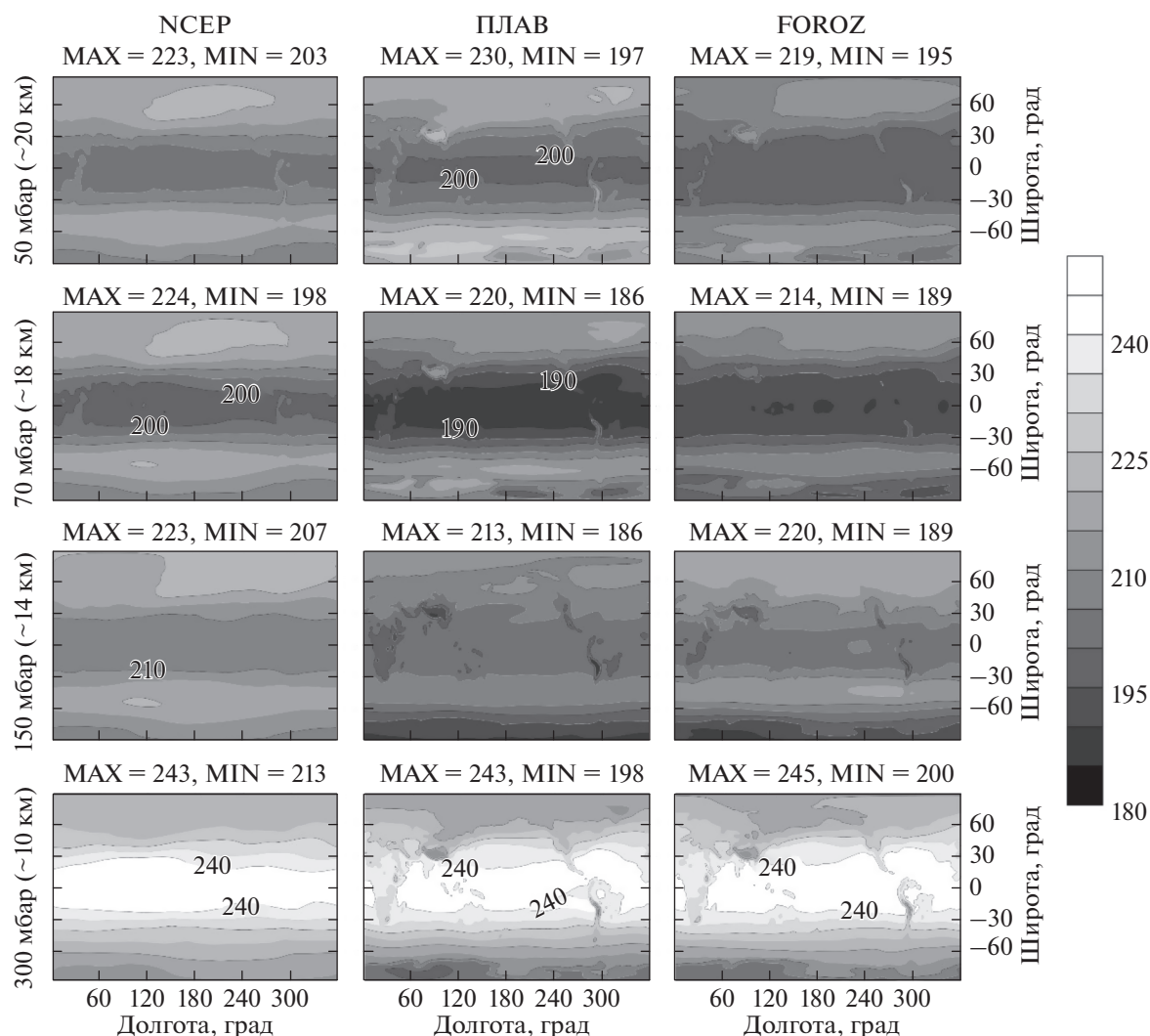


Рис. 6. Глобальные поля температуры на высотах 10, 14, 18 и 20 км для октября 1999 г. по данным реанализа NCEP и трехмесячным прогнозам моделей ПЛАВ и FOROZ.

На рисунке 9 представлена рассчитанная на основе температурных данных реанализа и трехмесячных прогнозов по модели ПЛАВ и объединенной модели FOROZ глобальная невязка для октября 1999 г.

Видно, что существуют некоторые отличия по сравнению с рис. 8, однако в целом поведение глобальной невязки температуры по высоте сходно. Интересным представляется наличие минимума невязки в районе тропопаузы (300 мбар).

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты пробных прогнозов по новой экспериментальной технологии (т.е. создана новая версия модели прогноза) с подключенным фотохимическим модулем, в котором происходит расчет трехмерных глобальных полей

озона на основе решения полной фотохимической системы уравнений и с учетом глобального пространственного переноса химически активной примеси, а также проведенное сравнение показало, что модель работает устойчиво.

Представляется, что основное расхождение с данными реанализа обусловлено орографией. Возможно, следует более детально проанализировать работу соответствующего модуля.

Следует также отметить, что в качестве перспективы развития работ в этом направлении важно было бы поднять верхнюю границу модели ПЛАВ, чтобы улучшить прогноз на стратосферных уровнях и добиться более полного соответствия с работой фотохимического блока, имеющего верхнюю границу на высоте 90 км.

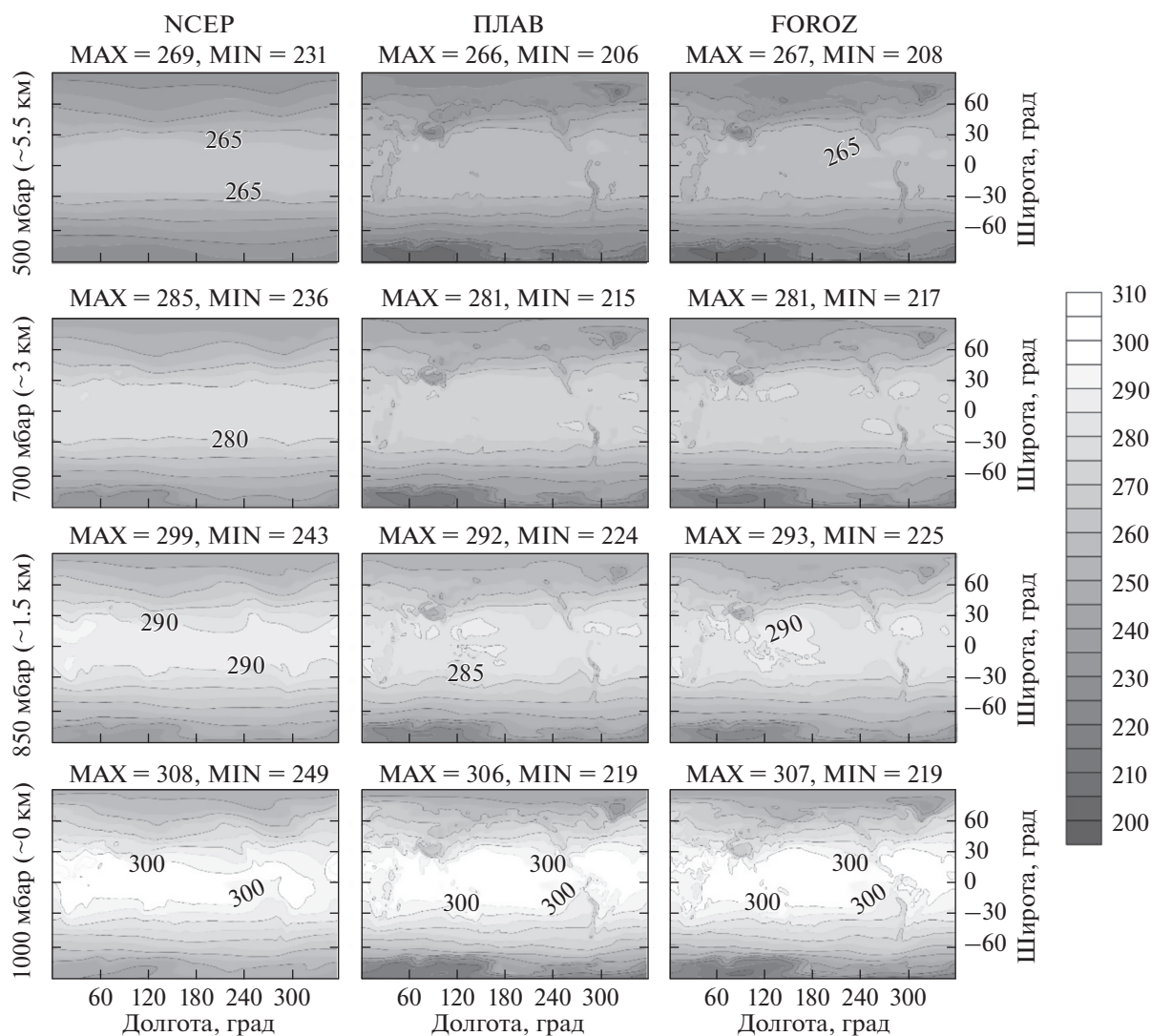


Рис. 7. Глобальные поля температуры на высотах 0, 1.5, 3, и 5.5 км для октября 1999 г. по данным реанализа NCEP и трехмесячным прогнозам моделей ПЛАВ и FOROZ.

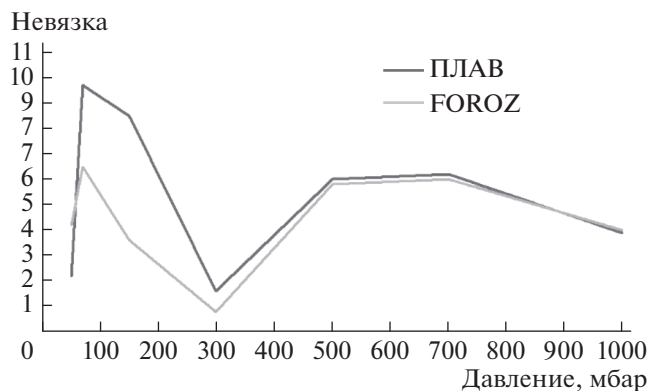


Рис. 8. Рассчитанная на основе температурных данных реанализа NCEP и трехмесячных прогнозов по модели ПЛАВ и объединенной модели FOROZ глобальная невязка для апреля 1999 г.

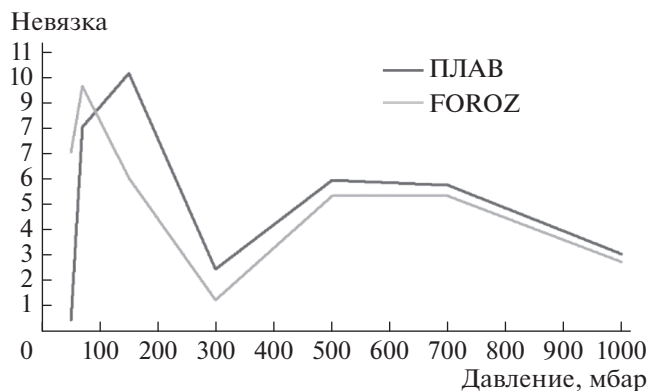


Рис. 9. Рассчитанная на основе температурных данных реанализа и трехмесячных прогнозов по модели ПЛАВ и объединенной модели FOROZ глобальная невязка для апреля 1999 г.

Еще одним ресурсом (направлением) на наш взгляд было бы более полноценное использование модели общей циркуляции ARM.

Созданная версия модели сезонного прогноза может быть передана в Гидрометцентр РФ в случае соответствующего запроса.

## 6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Laboratory for Atmospheric and Space Physics (LASP) at the University of Colorado Boulder за предоставление данных о потоках УФ-радиации Солнца по данным спутниковых наблюдений SORCE (<http://lasp.colorado.edu/sorce>).

Использованные среднемесячные температурные данные основаны на ежедневных данных реанализа “NCEP Daily Global Analyses”, которые получены в рамках совместного проекта NCEP (Национальный центр США прогноза окружающей среды) и NCAR (Национальный центр США исследования атмосферы). Открытый доступ к банку данных предоставлен NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, на сайте (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/>).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Криволицкий А.А., Вьюшкова Т.Ю., Черепанова Л.А., Куколева А.А., Репнев А.И., Банин М.В. Трехмерная глобальная фотохимическая модель CHARM. Учет вклада солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 55. № 1. С. 64–93. 2015а.
- Криволицкий А.А., Черепанова Л.А., Дементьева А.В., Репнев А.И., Ключникова А.В. Глобальная циркуляция атмосферы Земли на высотах от 0 до 135 км, рассчитанная с помощью модели ARM. Учет вклада солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 55. № 6. С. 808–828. 2015б.
- Толстых М.А. Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды. М.: Обнинск: ОАО ФОП, 111 с. 2010.
- Chou M.-D., Suarez M.J. An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in General Circulation Models. NASA Technical Memorandum 104606, GSFC, Greenbelt, Maryland. V. 3. 85 p. 1994.
- Ebel A., Hass H., Jacobs H.J., Planetary wave dynamics in the mesosphere and lower mesosphere // Adv. Space Res. V. 12. № 10. P. (10)17–(10)25. 1992.
- Fomichev V.I., Blanchet J.-P., Turner D.S. Matrix parameterization of the 15  $\mu\text{m}$  CO<sub>2</sub> band cooling in the middle and upper atmosphere for variable CO<sub>2</sub> concentration // J. Geophys. Res. V. 103. P. 11505–11528. 1998. <https://doi.org/10.1029/98JD00799>
- <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>
- <http://lasp.colorado.edu/sorce>
- Jacobs H.J., Bishop M., Ebel A., Speth P. Simulation of gravity wave effects under solstice conditions using a 3-d circulation model of the middle atmosphere // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 48. № 11–12. P. 1203–1223. 1986.
- Krivolutsky A., Kuminov A., Vyushkova T. Ionization of the atmosphere caused by solar protons and its influence on ozonosphere of the Earth during 1994–2003 // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 67. № 1–2. P. 105–117. 2005.
- Lindzen R.S. Turbulence and stress owing to gravity wave and tidal breakdown // J. Geophys. Res. V. 86. № C10. P. 9707–9714. 1981.
- Prather M. Numerical advection by conservation of second-order moments // J. Geophys. Res. V. 91. № D6. P. 6671–6681. 1986.
- Turco R.P., Whitten R.C. A comparison of several computational techniques for solving some common aeronomic problems // J. Geophys. Res. V. 79. № 22. P. 3179–3185. 1974.