

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-3-49-63>

УДК 551.509.33

Включение параметризации ecRad в модель ПЛАВ и ее влияние на атмосферную циркуляцию на годовом и сезонном масштабах

Р.Ю. Фадеев^{2,1,3}, М.А. Толстых^{1,2,3}, Е.О. Бирючева¹, Г.С. Гойман^{2,1,3}

*¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия;*

*²Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука
Российской академии наук, г. Москва, Россия;*

*³Московский физико-технический институт,
г. Долгопрудный Московской области, Россия
m.tolstykh@inm.ras.ru*

Представлены результаты замены параметризаций коротковолновой и длинноволновой радиации в глобальной модели атмосферы ПЛАВ на свободнораспространяемую параметризацию ecRad. Эффект от такой замены оценивался на годовом и сезонном масштабах. Показано, что усовершенствованная и настроенная модель точнее воспроизводит среднегодовое и среднесезонное поле осадков, как в интегральных характеристиках, так и в географическом распределении. Уменьшились ошибки воспроизведения среднесезонной атмосферной циркуляции в тропиках вблизи поверхности. Внедрение параметризации радиации ecRad с ecCKD позволило ускорить расчеты сезонных прогнозов модели ПЛАВ на 17 %.

Ключевые слова: модель общей циркуляции атмосферы, радиационные потоки тепла в атмосфере, долгосрочный прогноз погоды

Inclusion of ecRad parameterization in the SL-AV atmosphere model and its effect on atmospheric circulation at annual and seasonal timescales

R.Yu. Fadeev^{2,1,3}, M.A. Tolstykh^{1,2,3}, E.O. Biryucheva¹, G.S. Goyman^{2,1,3}

¹Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;

*²Marchuk Institute of Numerical Mathematics
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;*

*³Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow region, Russia
m.tolstykh@inm.ras.ru*

The results of replacement of shortwave and longwave radiation parameterizations with freely distributed ecRad parameterization in the SL-AV atmosphere model are presented. The effect of this change is evaluated at seasonal and annual time scale. It is shown that the improved and adjusted model reproduces annual mean and seasonal mean precipitation field more accurately, both in integral characteristics and geographical distribution. The errors in the seasonally averaged tropical atmosphere circulation near the surface are reduced. Implementation of ecRad with ecCKD algorithm allows accelerating computations of SL-AV model seasonal forecasts by 17%.

Keywords: atmosphere general circulation model, radiation heat fluxes in the atmosphere, long-range weather forecast

Введение

Радиационный приток тепла (определяемый переносом, рассеянием и отражением солнечного и теплового излучения с учетом облачности) является важнейшим фактором, влияющим на динамику атмосферы. Ввиду значительной вычислительной сложности описание этих процессов для каждой линии спектра в моделях общей циркуляции атмосферы происходит обычно с помощью упрощенных подходов. В данной статье представлены особенности реализации пакета подпрограмм *esRad* [11] в модели ПЛАВ [3], а также первые результаты исследования отклика модельной циркуляции атмосферы на новый способ описания радиационных притоков тепла с обновленной климатологией аэрозолей на базе реанализа *SAMS* (*Copernicus Atmosphere Monitoring Service*) [14].

Модель ПЛАВ развивается в Гидрометцентре России и Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН. Модель ПЛАВ включает оригинальный блок решения уравнений динамики атмосферы [24] и блок параметризованного описания процессов подсеточного масштаба (кратко – блок параметризаций), в основном заимствованных (более подробно см. [4] и ссылки в этой работе).

Модель ПЛАВ имеет единую программную реализацию, которая применяется в различных конфигурациях для оперативного детерминистского [5] и ансамблевого среднесрочного прогноза, а также для вероятностного субсезонного и сезонного прогнозов аномалий погоды [4]. В системах прогноза на основе ПЛАВ для описания длинноволновой радиации сейчас используется свободно распространяемая параметризация *RRTMG LW* [18], а для коротковолнового излучения – *CLIRAD SW* [8, 22]. Параметризация *RRTMG LW* включает несколько вариантов для описания перекрытия облаков по вертикали: максимальное, максимально-случайное, экспоненциальное максимально-случайное и, наконец, бинарное. В то же время *CLIRAD SW*, помимо бинарного описания облачности, имеет лишь предвычисленное перекрытие облаков (таблицы для различных значений склонения Солнца, локального балла облачности и оптической толщины облака), полученное в предположении максимального перекрытия облаков в пределах каждой из групп облаков (нижнего, среднего и верхнего ярусов) [8]. Таким образом, в оперативных версиях модели ПЛАВ коротко- и длинноволновые компоненты радиационного притока тепла в присутствии облаков рассчитываются несогласованно. Кроме того, имеющиеся в ПЛАВ программные реализации этих параметризаций не позволяют использовать современные наборы данных по оптическим свойствам аэрозолей (в *CLIRAD SW* их всего 3 типа) для расчета их влияния на приток тепла, что ограничивает точность модели ПЛАВ. Замена существующих параметризаций описания радиационного притока тепла в ПЛАВ на свободно распространяемый пакет подпрограмм *esRad* решает проблему рассогласования и создает условия для дальнейшего повышения точности прогнозов путем учета влияния аэрозолей на эффективные радиусы капель и кристаллов в облаках в будущих версиях модели.

В численных экспериментах, представленных в данной работе, модель применялась в версии ПЛАВ072L96, предназначенной для долгосрочного прогноза погоды. Горизонтальное разрешение этой модели составляет $0,9^\circ$ по долготе и $0,72^\circ$ по широте, по вертикали используется 96 уровней. Описание ПЛАВ072L96 приводится в [4].

В статье в разделе 1 приводится краткое описание возможностей пакета *esRad* и особенности его подключения к модели ПЛАВ. В разделе 2 обсуждаются постановка численных экспериментов по воспроизведению атмосферной циркуляции на межгодовом масштабе и полученные по ним результаты. В разделе 3 представлены результаты исследования влияния замены радиационного блока в модели ПЛАВ на точность прогноза аномалий погоды на сезонном масштабе.

1. Пакет подпрограмм *esRad* и его внедрение в модель ПЛАВ

Пакет подпрограмм *EsRad* для расчета радиационных притоков тепла в атмосфере разработан под руководством Робина Хогана и Алессандро Боззо для модели численного прогноза погоды IFS Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП) [11]. Затем в *esRad* был реализован новый алгоритм *esCKD* [12], который продемонстрировал существенную экономию вычислительных ресурсов по сравнению с параметризациями *RRTMG SW* и *LW* при сопоставимой точности. Такой результат был достигнут в *esCKD* за счет внедрения оптимизированного по сравнению с *RRTMG* разделения спектра и улучшенной генерации *k*-распределений. Важное преимущество *esCKD* – возможность гибкой дискретизации спектра с целью балансировки между вычислительной сложностью и точностью расчетов путем задания пользовательских допусков к ошибкам и диапазонов концентрации радиационно-активных газов [12, 25]. Обе параметризации обеспечивают приблизительно одинаковую точность расчетов, однако программный код *esCKD* примерно в два раза быстрее [25]. В настоящее время *esRad* также применяется в модели численного прогноза погоды *ICON* немецкой метеослужбы.

Пакет *esRad* [10] включает необходимые для расчетов по нему данные по оптическим свойствам газов и аэрозолей. Пользователю предоставляется возможность выбора различных моделей газовой оптики (*RRTMG* либо *esCKD*), а также методов решения уравнения переноса излучения в присутствии облачности: метода Монте – Карло с независимыми столбцами (*McICA*) [7], *Tripleclouds*, в которой в ячейке расчетной сетки модели выделяются три части – безоблачная, с оптически тонкой облачностью и с оптически плотной облачностью, или метода учета трехмерных эффектов переноса излучения (*SPARTACUS*). В данной работе использован алгоритм *Tripleclouds* в оптимизированной версии [25], вычислительно быстрый по сравнению с *McICA*. Трехмерными эффектами переноса излучения в рамках данного исследования пренебрегается в силу грубого горизонтального разрешения расчетной сетки ПЛАВ072L96 в средних широтах (около 70 км).

есRad для расчета вертикального профиля потока коротко- и длинноволновой радиации использует в качестве входных данных вертикальные профили давления, температуры и относительной влажности, характеристики подстилающей поверхности (температура, альbedo, излучательная способность), косинус зенитного угла Солнца, а также данные о водности и ледности облаков.

В данной работе для есRad мы применяем те же алгоритмы расчета эффективных радиусов и насыщающей влажности, что и для радиационного блока на основе CLIRAD SW и RRTMG LW. Эффективные радиусы капель параметризуются согласно [17], кристаллов согласно [20, 21]. Для CLIRAD и RRTMG оптическая толщина облаков затем рассчитывается с использованием формул, полученных в [16] для капельных облаков и в [9] для кристаллических.

Реализованная в ПЛАВ версия есRad применяет метод расчета перекрытия облаков на основе параметра перекрытия. Наличие в CLIRAD SW предвычисленных в зависимости от среднестатистических характеристик погоды значений параметра перекрытия облаков объясняет отсутствие в ПЛАВ проверенного алгоритма его расчета. В то же время настройка параметра перекрытия облаков оказалась одним из наиболее сложных этапов адаптации пакета есRad к модели ПЛАВ.

Параметр перекрытия облаков [10] определяется формулой

$$Ov = \exp\left(-\frac{\Delta z}{L}\right),$$

где Δz – толщина слоя между соседними модельными уровнями по вертикали (м), рассчитанная из уравнения гидростатики; L – масштаб декорреляции (м). Величина Δz принимает значения в широком диапазоне: от приблизительно 700 метров вблизи верхней границы расчетной области до 100 метров около поверхности Земли.

Для вычисления L в ПЛАВ применяется формула [19], в которую входят четыре настраиваемых коэффициента $d1$, $d2$, $d3$ и $d4$:

$$L = d1 + d2 \cdot \exp\left(-\left(\frac{\varphi - d3 \cdot decli}{d4}\right)^2\right).$$

Здесь φ – широта в радианах; $decli$ – склонение Солнца данного дня года; $d1$ – минимальный масштаб декорреляции; $d2$ – максимальная амплитуда изменения этого масштаба; $d3$ – амплитуда изменения масштаба в зависимости от склонения Солнца; $d4$ – масштабирующий множитель.

Настройка коэффициентов $d1$, $d2$, $d3$, $d4$ проводилась в предположении, что в условиях одинаковых входных данных алгоритм расчета потоков длинноволновой радиации RRTMG LW в есRad и в исходной версии ПЛАВ должен давать одинаковый результат. Таким образом, проверка правильности вычисления параметра перекрытия облаков и связанного с ним масштаба декорреляции проводилась путем подбора значений коэффициентов в формуле для расчета L с целью минимизации

средней разности потоков длинноволновой радиации на поверхности Земли.

В качестве ориентира использовались диапазоны значений параметра перекрытия облаков O_v от 0,7 до 0,85 на верхних уровнях и 0,9–0,95 на нижних уровнях, рассчитанные с использованием двумерного автономного теста, реализованного в дистрибутиве программы *ecRad*.

После подбора значений масштаба декорреляции, адаптации входных данных *ecRad* достигнуто хорошее соответствие потоков длинноволновой радиации между программными реализациями *ecRad* и ПЛАВ на всех модельных уровнях при использовании одного и того же алгоритма *RRTMG LW*: средние отклонения близки к нулю, максимальные в отдельных точках трехмерной модельной сетки – около 12 Вт/м². Для коротковолновой радиации различия остались существенными: среднее отклонение составило величину около 30 Вт, в то время как максимальная разница достигала в отдельных узлах расчетной сетки 200 Вт. Такое отличие в величине потоков обусловлено главным образом наличием существенных различий между используемыми в пакете *ecRad* алгоритмами *RRTMG SW* и параметризацией *CLIRAD SW* модели ПЛАВ.

Изначально при настройке параметра перекрытия облаков для сравнения атмосферной циркуляции модели ПЛАВ при использовании двух различных радиационных блоков применялся один и тот же набор данных по климатологии оптической толщины четырех видов аэрозолей [23] для волны длиной 550 нм. Однако этот набор данных сильно устарел и к тому же имеет очень грубое пространственное разрешение 5° по долготе, 4° по широте. В исходной версии модели ПЛАВ применяется двумерный набор данных *MACv2* [15], содержащий более полную информацию по оптическим свойствам аэрозолей (оптическая толщина, параметры рассеяния и асимметрии) для различных длин волн на регулярной широтно-долготной сетке с шагом 1°. Поскольку алгоритмы *CLIRAD SW* и *RRTMG LW* оперируют отличающимися от имеющихся в *MACv2* диапазонами длин волн, а оптические свойства аэрозолей в них должны иметь высотную зависимость, в ПЛАВ реализован специализированный набор методов, к задачам которых относится подготовка данных *MACv2* для последующего использования в блоках расчета радиационных потоков. Сравнение результатов ПЛАВ с климатологией *MacV2* и [23] было выполнено ранее в работе [6].

Вместе с обновлением алгоритмов расчета радиационных потоков был заменен способ учета наличия аэрозолей в атмосфере. Для этого в ПЛАВ была реализована возможность использования данных реанализа *CAMS* [14], содержащего трехмерную (25 уровней по вертикали) информацию об удельной концентрации аэрозолей разных видов на сетке с горизонтальным разрешением 0,75°. Расчет оптических свойств аэрозолей в таком случае осуществлялся с учетом актуальных метеопараметров атмосферы (температура, влажность и давление). Использование в радиационных

блоках информации об удельной концентрации аэрозолей вместо агрегированных оптических характеристик, помимо повышения точности описания аэрозольно-радиационных связей, имеет еще одно важное преимущество. Таким образом открывается возможность явного воспроизведения в модели динамики аэрозолей при условии правильного задания их источников и стоков.

В дальнейшей части статьи сравнивается радиационный блок на основе CLIRAD SW и RRTMG LW с климатологией аэрозолей MACv2 и блок esRAD с алгоритмом esCKD и климатологией аэрозолей CAMS. Результаты расчетов на основе ПЛАВ показывают, что разница в оценках прогнозов между радиационными блоками в несколько раз больше, чем разница в оценках прогнозов одного и того же радиационного алгоритма, но при различной климатологии аэрозолей.

Существенным достоинством радиационного блока esRad с esCKD является его вычислительная эффективность по сравнению с алгоритмами CLIRAD SW и RRTMG LW. В версии для долгосрочного прогноза погоды ПЛАВ072L96, где расчетная сетка включает $400 \times 251 \times 96$ узлов, ускорение вычислений при переходе на esRad и esCKD составило примерно 17 %: время расчета одного участника ансамбля прогноза с заблаговременностью четыре месяца уменьшилось с 81 до 67 минут. В версии для среднесрочного детерминистского прогноза по модели ПЛАВ10 ускорение расчетов менее заметно и составляет величину около 8 %: 13 минут расчета прогноза на 24 часа вместо 14. Отметим, что шаг сетки по долготе в ПЛАВ10 составляет $0,1^\circ$, по широте применяется переменное разрешение в диапазоне шагов сетки от $0,08^\circ$ до $0,13^\circ$, по вертикали используется 104 уровня (расчетная сетка содержит $3600 \times 1946 \times 104$ узлов). В версии ПЛАВ20 (шаг сетки $0,225^\circ$ по долготе, $0,16-0,24^\circ$ по широте, 51 уровень по вертикали) для среднесрочного ансамблевого прогноза ускорение составило величину около 15 %.

2. Численные эксперименты по настройке модельного «климата»

Любое значимое изменение методологии описания физических процессов в атмосфере приводит, как правило, к изменению климата модели – значений метеорологических характеристик в свободной атмосфере и на поверхности, осредненных за достаточно большой промежуток времени. В качестве меры ошибки осредненного климата модели в работе используется интегральное среднеквадратическое отклонение исследуемого поля от реанализа ERA5, осредненного за тот же период. Эксперименты проводились с моделью ПЛАВ072L96 [4], которая интегрировалась на 5 лет с начальных условий реанализа ERA5 [13] за 30 октября 1995 года. В качестве граничных условий задавались в том числе температура поверхности океана и концентрация морского льда по данным реанализа ERA5.

Внедрение схемы расчета радиационных потоков тепла на основе *ecRad* с *ecCKD* вместе с переходом на климатологию аэрозолей *CAMS* сначала привело к существенной деградации качества описания динамики верхней и средней тропосферы: точность воспроизведения осредненного поля геопотенциала и температуры на поверхности 500 гПа ухудшилась на 20 и 27 % соответственно. На уровне 250 гПа ухудшение стало еще заметнее: 35 и 53 %. Вместе с тем точность описания других метеорологических характеристик моделью ПЛАВ072L96 в той же конфигурации улучшилось. Это коснулось качества описания потоков скрытого и явного тепла на поверхности (точность увеличилась более чем на 10 %), зонального компонента скорости ветра на поверхностях 500 и 850 гПа (изменение около 10 %), а также среднего по глобусу балла облаков верхнего яруса (изменение свыше 15 %).

В результате перенастройки модели удалось добиться уменьшения ошибок воспроизведения большинства осредненных характеристик атмосферы. Наибольшие улучшения можно отметить в описании балла облачности (свыше 30 %), потока скрытого тепла на поверхности (более 18 %) и осадков (также около 18 %). Сводная информация об изменении ошибок описания осредненного климата моделью ПЛАВ072L96 приводится в таблице, где строки соответствуют прогностическим величинам, а колонки – конфигурациям расчетной модели. Значения в ячейках таблицы соответствуют изменению в процентах интегральной ошибки воспроизведения метеорологической величины по сравнению с исходной версией модели *ec06a* с описанием радиационных потоков на основе *CLIRAD SW* и *RRTMG-LW* и климатологией аэрозолей *MACv2*. Все другие версии модели соответствуют конфигурации ПЛАВ072L96 с описанием радиационных потоков на основе пакета *ecRad* с использованием параметризации *ecCKD* и климатологией аэрозолей *CAMS*. Значения настраиваемых параметров в версиях *ec06a* и *ec06b* идентичны. В остальных версиях внесены следующие изменения:

- *ec06h* – изменено значение констант, участвующих в процедуре расчета фазовых переходов и влияющих на величину сконденсированной влаги в крупномасштабной облачности, с целью изменения процентного соотношения жидкой и твердой фаз в верхних слоях атмосферы. В таблице можно видеть, что данное изменение привело к существенному улучшению описания моделью облачности;

- *ec07a* – перенастроены коэффициенты в методе параметризованного описания турбулентности в пограничном слое атмосферы, уменьшено влияние осадков на перемешивание в свободной атмосфере и, в частности, вблизи поверхности Земли;

- *ec07n* – модифицированы значения коэффициентов в параметризации облачности с целью повышения точности описания облачности и облаков верхнего яруса в частности;

- *ec07u* – дополнительно уточнены значения коэффициентов в расчете турбулентных потоков в атмосфере.

Таблица. Изменение точности (%) воспроизведения атмосферной циркуляции моделью ПЛАВ в различных версиях по сравнению с исходной версией ec06a

Table. Changes in accuracy of SLAV model atmosphere circulation simulation in different versions with respect to original ec06a version

	Уровень	Идентификатор эксперимента				
		ec06b	ec06h	ec07a	ec07n	ec07y
Поток явного тепла	Поверхность	-2,7	-3,5	-5,4	-4,2	-7,2
Поток скрытого тепла	Поверхность	-10	-12	-15	-16	-19
Поток теплового излучения	Поверхность	-10	-6,8	-8,3	-8	-11
Поток солнечного излучения	Поверхность	1,1	-1,6	-1,7	-0,1	-0,1
Меридиональный компонент скорости ветра	10 м	-2,5	-1,8	-2,9	-1,5	-3,7
Зональный компонент скорости ветра	10 м	-8,1	-7,1	-6,3	-7,4	-11
Балл облачности верхнего яруса	-	-15	-20	-20	-17	-16
Балл облачности нижнего яруса	-	-1	-4	-4,3	-4,9	-5,2
Балл облачности	-	-16	-28	-29	-29	-30
Температура	250 гПа	53	49	34	17	-6,7
	500 гПа	28	27	18	8,9	-5,2
	850 гПа	9,4	5,6	3,7	5,8	7
Меридиональный компонент скорости ветра	250 гПа	-6,2	-4,6	-8,5	-7,6	-9,3
	500 гПа	-4,6	-1,3	-7,8	-3,7	-5,9
	850 гПа	-6,6	-5,4	-7,2	-6,5	-8,9
Зональный компонент скорости ветра	250 гПа	-7,6	-9,4	-5,3	-7,2	-9,8
	500 гПа	-11	-12	-8	-8,7	-13
	850 гПа	-11	-9,6	-8,1	-9,3	-13
Высота геопотенциальной поверхности	250 гПа	35	33	24	14	-2
	500 гПа	20	17	12	7,7	0,2
	850 гПа	-1,8	-4,2	-4,5	-5,2	-5,5
Давление на уровне моря	-	-2,6	-3,4	-5,7	-5,1	-7,2
Осадки	Поверхность	-9,8	-9,2	-14	-15	-19

На рис. 1а и 1б иллюстрируется осредненное за 60 месяцев поле осадков (мм/сут) на поверхности Земли по результатам расчетов по модели ПЛАВ072L96 в версиях ec06a и ec07y. На рис. 1в приводится осредненное за тот же период времени поле осадков по данным реанализа ERA5, на рис. 1г – отклонение осредненного поля осадков в модели ПЛАВ072L96 в версии ec07y от реанализа ERA5.

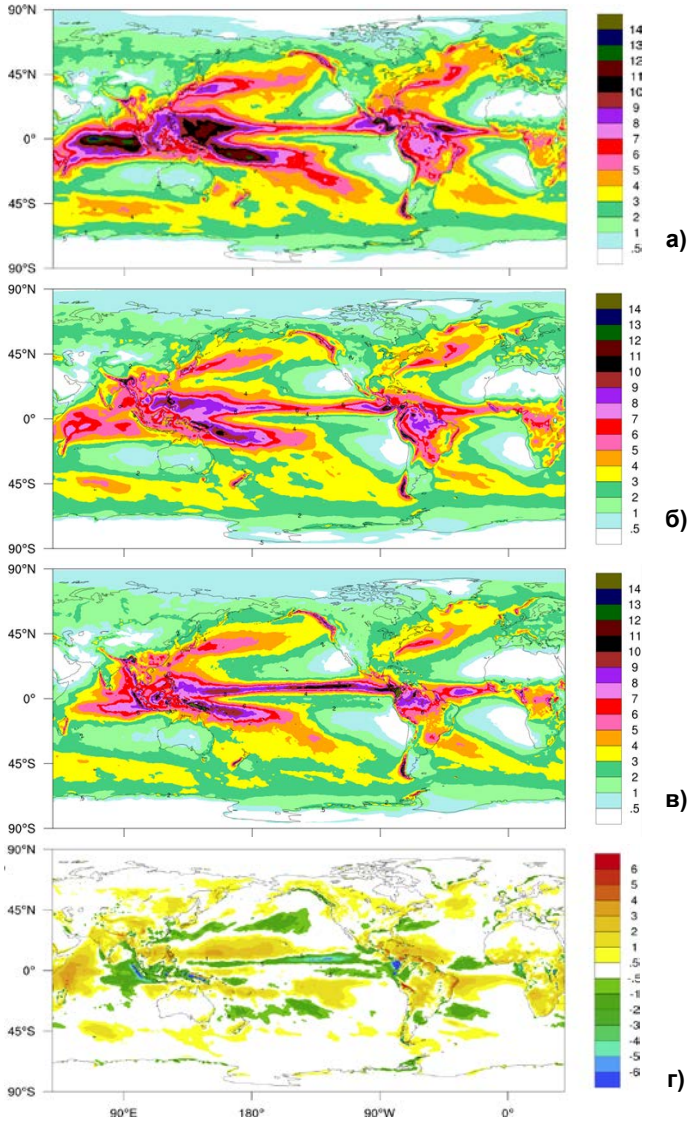


Рис. 1. Осредненное с 30.10.1995 по 30.10.2000 поле осадков (мм/сут) в конфигурациях ПЛАВ ec06a (а) и ec07y (б), реанализе (в); отклонение осредненного за тот же период поля осадков в конфигурации ec07y ПЛАВ от реанализа (г).

Fig. 1. Precipitation field [mm/day] averaged over 30.10.1995 - 30.10.2000 in SLAV configurations ec06a (a) and ec07y (б); in ERA5 reanalysis (в); difference of ec07y SLAV configuration from reanalysis (г).

Можно видеть, что внедрение новых подходов к расчету радиационных потоков в атмосфере и новой климатологии аэрозольей вместе с перенастройкой модели позволило заметно уменьшить общее количество среднегодовых осадков с 3,55 до 3,12 мм/сут, улучшив таким образом

согласие с реанализом и результатами эксперимента TRMM, по данным которого интегрально по глобусу в среднем за год выпадает около 2,97 мм/сут осадков. Для версии модели с блоком esRad характерен перегрев верхних слоев атмосферы. Однако среднеквадратическая ошибка воспроизведения среднегодового поля температуры на уровнях 500 и 250 гПа уменьшена с $1,39^\circ$ до $1,15^\circ$ и с $1,97^\circ$ до $1,65^\circ$ соответственно (сравниваются конфигурации ПЛАВ072L96 в версиях es06a и es07y).

Интегральные среднегодовые потоки тепла на поверхности в версии es07y по сравнению с es06a стали лучше соответствовать значениям, рекомендованным Межправительственной группой экспертов по изменениям климата: поток солнечного излучения уменьшился с 170,1 до 163,3 Вт/м² (рекомендованный диапазон значений: 154–166, среднее значение: 161 Вт/м²); поток теплового излучения изменился с $-57,6$ на $-55,9$ Вт/м² (рекомендованное среднее значение -56 Вт/м²); поток явного тепла уменьшился с $-17,8$ до $-16,9$ Вт/м² (рекомендованный диапазон 15–25 Вт/м²); среднегодовой интегральный поток скрытого тепла уменьшился с $-96,8$ до $-85,8$ Вт/м² (рекомендованный диапазон: 70–85 Вт/м²). Таким образом, усовершенствованную версию модели удалось точнее настроить в части ее осредненных за пять лет характеристик циркуляции атмосферы и в приповерхностном слое в частности. Ухудшение общего баланса тепла на поверхности является предметом для дальнейшего совершенствования и настройки модели.

3. Воспроизведение циркуляции на сезонных масштабах

Модель ПЛАВ072L96, настроенная на воспроизведение среднегодовой атмосферной циркуляции, была проверена на серии сезонных прогнозов (расчет на 123 суток) по начальным данным реанализа ERA5 за 30 января, 30 апреля, 30 июля и 30 октября за период с 1991 по 2015 год, сроки 00, 06 12 и 18 ч ВСВ. Эволюция температуры поверхности океана и концентрации морского льда описывалась простой моделью, так же как и в оперативной технологии модели ПЛАВ – в начальный момент прогноза эти поля задались из реанализа, с постепенной релаксацией к климатическим значениям для каждого дня [4]. Также при расчете прогнозов использовалось стохастическое возмущение трех параметров в параметризациях [1]. Каждый прогноз рассчитывался с одних и тех же начальных данных три раза, таким образом размер прогностического ансамбля составлял 12 членов.

Успешность прогнозов оценивалась по наставлению ВМО [2] на сетке с разрешением 1.5° по долготе и широте отдельно по территории внетропической части Северного полушария ($20-90^\circ$ с. ш.), тропики (20° ю. ш. – 20° с. ш.), внетропической части Южного полушария ($20-90^\circ$ ю. ш.). Оценивались прогнозы давления на уровне моря (MSLP), высоты поверхности 500 гПа (H500), температуры на поверхности 850 гПа (T850), приземной температуры (T2M) и осадков (PREC). Рассматривались средние ошибок прогнозов, стартовавших с начальных данных за все даты начальных данных.

Рассчитывалась среднеквадратическая ошибка RMSE, площадь под кривой ROC, по градам выше ROCAa и ниже ROCAb нормы для среднего со второго по четвертый месяц. Оценки ROCA для градации около нормы у сравниваемых вариантов достаточно близки для всех оцениваемых метеорологических величин. Также рассчитывались коэффициенты корреляции полей.

На рис. 2 приведены среднеквадратические ошибки указанных выше величин для различных регионов. Среднеквадратические ошибки для приземных характеристик и температуры поверхности 850 гПа в тропиках меньше у варианта модели ПЛАВ с описанием радиации с помощью ecRad.

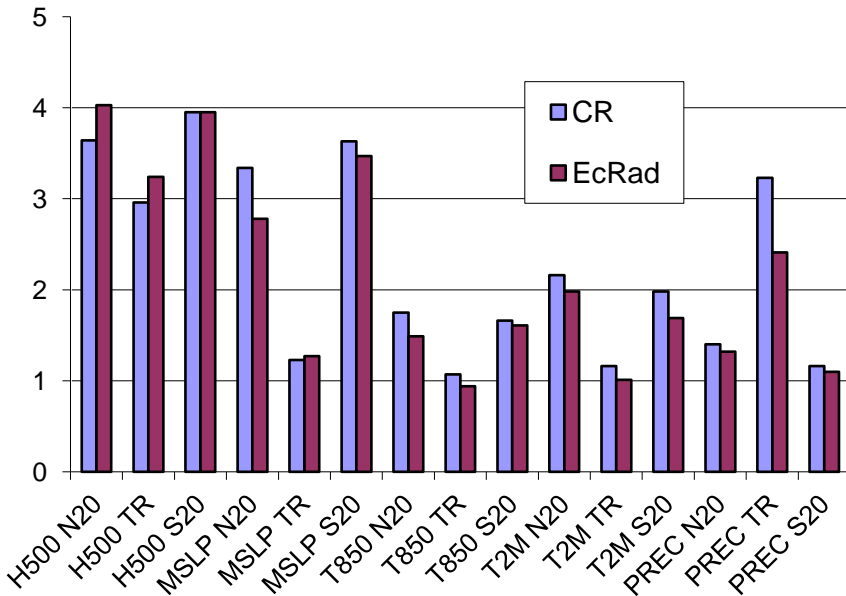


Рис. 2. Сравнение исторических прогнозов модели ПЛАВ072L96 с радиационными блоками CLIRAD SW и RRTMG LW (CR) и блоком ecRad (ecRad). Среднеквадратические ошибки полей высоты поверхности 500 гПа (H500), давления на уровне моря (MSLP), температуры на поверхности 850 гПа (T850), температуры на уровне 2м (T2м), осадков (PREC) по отношению к полям реанализа ERA5, осредненные по историческим прогнозам за 25 лет. S20 – внетропическая часть Южного полушария, TR – тропики, N20 – внетропическая часть Северного полушария. Единицы: H500 – дам, давление на уровне моря – гПа, T850 и T2м – градусы, осадки – мм/сут.

Fig. 2. Comparison of historical forecasts for different meteorological parameters with radiation codes CLIRAD SW and RRTMG LW (CR) and ecRad (ecRad). Root mean squared error for isobaric 500 hPa surface height (H500), mean sea-level pressure (MSLP), temperature at 850 hPa (T850), 2-meter temperature (T2m), precipitation (Prec) with respect to ERA5 reanalysis fields, averaged over 25-years historical forecasts. Units are dam for H500, degrees for T850 and T2m, mm/day for precipitation. Here N means extratropical of Northern hemisphere, TR means tropics, and S means extratropical part of Southern Hemisphere.

Такой же результат получен для давления на уровне моря во внетропической части Северного полушария. Коэффициенты полной корреляции для тех же величин не продемонстрировали существенных различий при использовании различных параметризаций радиации, за исключением коэффициента корреляции поля осадков в тропиках (увеличение с 0,69 до 0,75), температуры на поверхности 850 гПа в тропиках (увеличение с 0,888 до 0,912), давления на уровне моря в тропиках (с 0,903 до 0,933) и во внетропической части Северного полушария (с 0,853 до 0,878). Площади под кривой ROC для аномалий выше и ниже нормы значимо не изменились.

На основе полученных результатов можно отметить преимущество модели ПЛАВ с радиационным блоком esRad в воспроизведении тропической циркуляции на сезонном масштабе для всех рассматриваемых переменных, кроме высоты поверхности 500 гПа. Также заметно повышение точности воспроизведения осадков во всех регионах.

Заключение

В работе представлены результаты включения параметризации радиационных притоков тепла esRad в модель атмосферы ПЛАВ, оцененные с помощью численных экспериментов на среднегодовом и сезонном временном масштабе. Применение пакета esRad вместе с переходом на климатологию аэрозолей на базе реанализа CAMS заметно повысило точность воспроизведения среднегодового и среднесезонного поля осадков, как в интегральных характеристиках, так и в географическом распределении. Также точнее стала воспроизводиться среднесезонная атмосферная циркуляция в тропиках вблизи поверхности.

Внедрение пакета esRad позволяет экономить от 8 до 17 % вычислительных ресурсов в зависимости от конфигурации модели ПЛАВ. Наибольшее ускорение достигается в модели ПЛАВ072L96, предназначенной для долгосрочного прогноза аномалий погоды.

В дальнейшем планируется настроить версии модели, предназначенные для детерминистского и ансамблевого среднесрочного прогноза. Запланированы исследования по влиянию климатологии аэрозолей, в частности, различных способов задания их начальных условий, влиянию аэрозолей на процессы конденсации в облаках.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-17-00314, <https://rscf.ru/project/25-17-00314>.

Список литературы

1. Алипова К.А., Толстых М.А., Фадеев Р.Ю. Применение стохастических возмущений параметров в версии модели ПЛАВ для долгосрочных прогнозов // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2024. № 1 (391). С. 6-23. <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-1-6-23>.

2. Наставление по Комплексной системе обработки и прогнозирования ВМО. Дополнение IV к Техническому регламенту ВМО // ВМО-№ 485. Женева: ВМО, 2023. ISBN 978-92-63-40485-5.

3. Толстых М.А., Желен Ж.Ф., Володин Е.М., Богословский Н.Н., Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б., Красюк Т.В., Кострыкин С.В., Мизяк В.Г., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Шляева А.В., Эзау И.Н., Юрова А.Ю. Разработка многомасштабной версии глобальной модели атмосферы ПЛАВ // *Метеорология и гидрология*. 2015. № 6. С. 25-35.

4. Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Зарипов Р.Б., Травова С.В., Гойман Г.С., Алипова К.А., Мизяк В.Г., Тищенко В.А., Круглова Е.Н. Модель долгосрочного метеорологического прогноза ПЛАВ072L96 // *Метеорология и гидрология*. 2024. № 7. С. 25-39.

5. Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Гойман Г.С., Зарипов Р.Б., Мизяк В.Г., Рогутов В.С., Алипова К.А., Бирючева Е.О. Глобальная модель ПЛАВ10 для среднесрочного прогноза погоды // *Метеорология и гидрология*. 2025. № 6. С. 56-66.

6. Фадеев Р. Ю., Толстых М. А., Володин Е. М. Климатическая версия модели атмосферы ПЛАВ: разработка и первые результаты // *Метеорология и гидрология*. 2019. № 1. С. 22-34.

7. Barker H., Cole J., Morcrette J.-J., Pincus R., Räisänen P., von Salzen K., Vaillancourt P. The Monte Carlo Independent Column Approximation: An assessment using several global atmospheric models // *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 2008. Vol. 134. P. 1463-1478. <https://doi.org/10.1002/qj.303>.

8. Chou M.-D., Suarez M.J. A solar radiation parameterization (CLIRAD-SW) for atmospheric studies // NASA Tech. Memo-1999-104606. 2013. Vol. 15. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD. 48 p.

9. Fu Q., Yang P., Sun W. B. An accurate parametrization of the infrared radiative properties of cirrus clouds of climate models // *J. Climate*. 1998. Vol. 11. P. 2223-2237.

10. Hogan R.J., Illingworth A.J. Deriving cloud overlap statistics from radar // *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 2000. Vol. 126. P. 2903-2909.

11. Hogan R.J., Bozzo A. A flexible and efficient radiation scheme for the ECMWF model // *J. Adv. Mod. Earth Sys.* 2018. Vol. 10. P. 1990-2008.

12. Hogan R.J., Matricardi M. A Tool for Generating Fast k-Distribution Gas-Optics Models for Weather and Climate Applications // *J. Adv. Mod. Earth Sys.* 2022. Vol. 14. e2022MS003033. <https://doi.org/10.1029/2022MS003033>.

13. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., Thépaut J.-N. The ERA5 global reanalysis // *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 2024. Vol. 150. P. 4014-4048. <https://doi.org/10.1002/qj.4803>.

14. Inness A., Ades M., Agustí-Panareda A., Barré J., Benedictow A., Blechschmidt A.-M., Dominguez J. J., Engelen R., Eskes H., Flemming J., Huijnen V., Jones L., Kipling Z., Massart, S., Parrington M., Peuch V.-H., Razinger M., Remy S., Schulz M., Suttie M. The CAMS reanalysis of atmospheric composition // *Atmos. Chem. Phys.* 2019. Vol. 19. P. 3515-3556. <https://doi.org/10.5194/acp-19-3515-2019>.

15. Kinne S. The MACv2 aerosol climatology // *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*. 2019. Vol. 71. P. 1-21. DOI: 10.1080/16000889.2019.1623639.

16. Lindner T.H., Li J. Parameterization of the optical properties for water clouds in the infrared // *J. Climate*. 2000. Vol. 13. P. 1797-1805.

17. Martin G. M., Johnson D.W., Spice A. The measurement and parameterization of effective radius of droplets in warm stratocumulus // *J. Atmos. Sci.* 1994. Vol. 51. P. 1823-1842.

18. Mlawer E.J., Taubman S.J., Brown P.D., Iacono M.J., Clough S.A. RRTM, a validated correlated-k model for the longwave // *J. Geophys. Res.* 1997. Vol. 102. P. 16, 663-16, 682.

19. Oreopoulos L., Lee D., Sud Y.C., Suarez M.J. Radiative impacts of cloud heterogeneity and overlap in an atmospheric General Circulation Model // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. Vol. 12. P. 9097-9111. <https://doi.org/10.5194/acp-12-9097-2012>.

20. Sun Z., Rikus L. Parameterization of effective sizes of cirrus-cloud particles and its verification against observations // *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* 1999. No. 125. P. 3037-3055.

21. Sun Z. Reply to comments by G.M.McFarquhar on «Parametrization of effective sizes of cirrus-cloud particles and its verification against observations» // Q. J. Roy. Meteorol. Soc. 2001. No. 127. P. 267-271.

22. Tarasova T., Fomin B. The Use of New Parameterizations for Gaseous Absorption in the CLIRAD-SW Solar Radiation Code for Models // J. Atmos. Oceanic Techn. 2007. Vol. 24, no 6. P. 1157-1162.

23. Tegen I., Hoorig P., Chin M., Fung I., Jacob D., Penner J. Contribution of different aerosol species to the global aerosol extinction optical thickness: Estimates from model results // J. Geophys. Res. 1997. Vol. 102. P.23895-23915.

24. Tolstykh M., Shashkin V., Fadeev R., Goyman G. Vorticity-divergence semi-Lagrangian global atmospheric model SL-AV20: dynamical core // Geosci. Model Dev. 2017. Vol. 10. P. 1961-1983.

25. Ukkonen P., Hogan R.J. Twelve Times Faster yet Accurate: A New State-Of-The-Art in Radiation Schemes via Performance and Spectral Optimization // J. Adv. Mod. Earth Sys. 2023. Vol. 16. e23MS003932. <https://doi.org/10.1029/2023MS003932>

References

1. Alipova K.A., Tolstikh M.A., Fadeev R. Yu., Primenenie stokhasticheskikh vozmuschenii parametrov v versii modeli PLAV dlia dolgosrochnikh prognozov [Application of stochastic parameter perturbations in SL-AV model version for long-range forecasting]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozi* [Hydrometeorological research and forecasting], 2024, no. 1 (391), pp. 6-23 [in Russ.].

2. WMO-No. 485. Manual on the WMO Integrated Processing and Prediction System. Geneva, World Meteorological Organization (WMO), 2023. ISBN 978-92-63-40485-4. Available at <https://library.wmo.int/idurl/4/35703>.

3. Tolstykh M.A., Geleyn J.-F., Volodin E.M., Bogoslovskii N.N., Vilfand R.M., Kiktev D.B., Krasjuk T.V., Kostykin S.V., Mityak V.G., Fadeev R. Yu., Shashkin V.V., Shlyayeva A.V., Ezau I.N., Yurova A.Yu. Development of the Multiscale Version of the SL-AV Global Atmosphere Model. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2015, vol. 40, no. 6, pp. 374-382 [in Russ.].

4. Tolstykh M.A., Fadeev R.Y., Shashkin V.V., Zaripov R.B., Travova S.V., Goyman G.S., Alipova K.A., Mityak V.G., Tischenko V.A., Kruglova E.N. The SLAV072L96 Model for Long-range Meteorological Forecasts. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2024, vol. 49, no. 7, pp. 576-586 [in Russ.].

5. Tolstykh M.A., Fadeev R.Yu., Shashkin V.V., Goyman G.S., Zaripov R.B., Mityak V.G., Rogutov V.S., Alipova K.A., Biryucheva E.O. Global SLAV10 model for medium-range weather prediction. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2025, vol. 50, no. 6, pp. 473-481 [in Russ.].

6. Fadeev R.Yu., Tolstykh M.A., Volodin E.M. Climate Version of the SL-AV Atmosphere Model: Development and First Results. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2019, vol. 44, no. 1, pp. 13-22 [in Russ.].

7. Barker H., Cole J., Morcrette J.-J., Pincus R., Räisänen P., von Salzen K., Vaillancourt P. The Monte Carlo Independent Column Approximation: An assessment using several global atmospheric models. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2008, vol. 134, pp. 1463-1478. <https://doi.org/10.1002/qj.303>.

8. Chou M.-D., Suarez M. J. A solar radiation parameterization (CLIRAD-SW) for atmospheric studies – 1999. *NASA Tech. Memo-1999-104606*, 2013, vol. 15, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, 48 p.

9. Fu Q., Yang P., Sun W. B. An accurate parametrization of the infrared radiative properties of cirrus clouds of climate models. *J. Climate*, 1998, vol. 11, pp. 2223-2237.

10. Hogan R.J., Illingworth A.J. Deriving cloud overlap statistics from radar. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 2000, vol. 126, pp. 2903-2909.

11. Hogan R.J., Bozzo A. A flexible and efficient radiation scheme for the ECMWF model. *J. Adv. Mod. Earth Sys.*, 2018, vol. 10, pp. 1990-2008.

12. Hogan R.J., Matricardi M. A Tool for Generating Fast k-Distribution Gas-Optics Models for Weather and Climate Applications. *J. Adv. Mod. Earth Sys.*, 2022, vol. 14, e2022MS003033. <https://doi.org/10.1029/2022MS003033>

13. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., Thépaut J.-N. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2024, vol. 150, pp. 4014-4048. <https://doi.org/10.1002/qj.4803>.

14. Inness A., Ades M., Agustí-Panareda A., Barré J., Benedictow A., Blechschmidt A.-M., Dominguez J. J., Engelen R., Eskes H., Flemming J., Huijnen V., Jones L., Kipling Z., Massart, S., Parrington M., Peuch V.-H., Razinger M., Remy S., Schulz M., Suttie M. The CAMS reanalysis of atmospheric composition. *Atmos. Chem. Phys.*, 2019, vol. 19, pp. 3515-3556. <https://doi.org/10.5194/acp-19-3515-2019>.

15. Kinne S. The MACv2 aerosol climatology. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2019, vol. 71, pp. 1-21. DOI: 10.1080/16000889.2019.1623639.

16. Lindner T.H., Li J. Parameterization of the optical properties for water clouds in the infrared. *J. Climate*, 2000, vol. 13, pp. 1797-1805.

17. Martin G. M., Johnson D.W., Spice A. The measurement and parameterization of effective radius of droplets in warm stratocumulus. *J. Atmos. Sci.*, 1994, vol. 51, pp. 1823-1842.

18. Mlawer E.J., Taubman S.J., Brown P.D., Iacono M.J., Clough S.A. RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, 1997, vol. 102, pp. 16, 663-16, 682.

19. Oreopoulos L., Lee D., Sud Y. C., Suarez M. J. Radiative impacts of cloud heterogeneity and overlap in an atmospheric General Circulation Model. *Atmos. Chem. Phys.*, 2012, vol. 12, pp. 9097-9111. <https://doi.org/10.5194/acp-12-9097-2012>.

20. Sun Z., Rikus L. Parametrization of effective sizes of cirrus-cloud particles and its verification against observations. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 1999, no. 125, pp. 3037-3055.

21. Sun Z. Reply to comments by G.M.McFarquhar on «Parameterization of effective sizes of cirrus-cloud particles and its verification against observations». *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 2001, no. 127, pp. 267-271.

22. Tarasova T., Fomin B. The Use of New Parameterizations for Gaseous Absorption in the CLIRAD-SW Solar Radiation Code for Models. *J. Atmos. Oceanic Techn.*, 2007, vol. 24, no 6, pp. 1157-1162.

23. Tegen I., Hoorig P., Chin M., Fung I., Jacob D., Penner J. Contribution of different aerosol species to the global aerosol extinction optical thickness: Estimates from model results. *J. Geophys. Res.*, 1997, vol. 102, pp. 23895-23915.

24. Tolstykh M., Shashkin V., Fadeev R., Goyman G. Vorticity-divergence semi-Lagrangian global atmospheric model SL-AV20: dynamical core. *Geosci. Model Dev.*, 2017, vol. 10, pp. 1961-1983.

25. Ukkonen P., Hogan R.J. Twelve Times Faster yet Accurate: A New State-Of-The-Art in Radiation Schemes via Performance and Spectral Optimization. *J. Adv. Mod. Earth Sys.*, 2023, vol. 16, e23MS003932. <https://doi.org/10.1029/2023MS003932>.

Поступила 05.09.2025; одобрена после рецензирования 01.10.2025;
принята в печать 15.10.2025.

Submitted 05.09.2025; approved after reviewing 01.10.2025;
accepted for publication 15.10.2025.