

УДК 551.509.5

Развитие глобальной полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ в 2009–2019 гг.

**М.А. Толстых^{1,2,3}, Р.Ю. Фадеев^{2,1,3}, В.В. Шашкин^{2,1},
С.В. Травова (Махнорылова)¹, Г.С. Гойман^{2,1}, В.Г. Мизяк¹,
В.С. Рогутов¹, А.В. Шляева⁴, А.Ю. Юрова⁵**

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

²Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука, г. Москва, Россия;

³Московский физико-технический институт,
г. Долгопрудный Московской области, Россия;

⁴Кооперативный институт исследований в области наук
об окружающей среде, Боулдер, США;

⁵Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

В статье рассмотрены работы, выполненные по развитию модели атмосферы ПЛАВ в последнее десятилетие, и их результаты. Представлены версии модели, применяемые для оперативного среднесрочного прогноза, а также версии модели для долгосрочного прогноза погоды. Результаты проиллюстрированы графиками эволюции ошибок прогнозов различных метеорологических полей за период 2012–2019 гг. Представлены планы развития модели, в том числе ведутся работы по созданию глобальной модели атмосферы нового поколения, основанной на полных негидростатических уравнениях. В статье описаны выбранные подходы к разработке динамического ядра будущей модели.

Ключевые слова: численный прогноз погоды, глобальная модель общей циркуляции атмосферы, решение уравнений динамики атмосферы, параметризации процессов подсеточного масштаба, среднесрочный прогноз погоды

Development of SL-AV global semi-Lagrangian atmosphere model in 2009–2019

**M.A. Tolstykh^{1,2,3}, R.Yu. Fadeev^{2,1,3}, V.V. Shashkin^{2,1},
S.V. Travova (Makhnorylova)¹, G.S. Goyman^{2,1}, V.G. Miziak¹,
V.S. Rogutov¹, A.V. Shlyayeva⁴, A.Yu. Yurova⁵**

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

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

³Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia;

⁴CIRES, Boulder, USA;

⁵St-Petersburg state university, St-Petersburg, Russia

The present paper considers the works on the development of SL-AV atmosphere model during last decade and their results. Different versions of the model applied for operational medium- and long-range forecasting are presented. The results are illustrated with the error evolution plots for the forecasts of different meteorological fields

over the period of 2012-2019. The plans for a further model development are presented: in particular, works on the development of the new generation global atmosphere model based on the full nonhydrostatic equations. The approaches selected for the development of the future model dynamical core are described.

Keywords: numerical weather prediction, atmosphere global circulation model, solution of atmosphere dynamics equations, parameterizations for subgrid-scale processes, medium-range weather forecasting

Введение

Глобальная полулагранжева модель атмосферы ПЛАВ (от Полу-Лагранжева, основанная на уравнении Абсолютной завихренности, в английском варианте – SL-AV) разработана в Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН и Гидрометцентре России.

Начало разработки модели ПЛАВ относится к 1995 году, когда появилась статья Рэя Бэйтса и Йонга Ли [17], посвященная полулагранжевой двумерной модели мелкой воды на сфере на основе уравнения потенциального вихря. Применение потенциальной завихренности в качестве прогностической переменной в трехмерном случае затруднено, поэтому в модели ПЛАВ используется вертикальный компонент абсолютной завихренности.

Модель ПЛАВ состоит из блока решения уравнений динамики атмосферы (далее – динамического ядра) собственной разработки и набора параметризаций подсеточного масштаба, в основном заимствованных.

В [9] была представлена первая трехмерная версия модели, которая имела разрешение $1,5^\circ$ по долготе и широте, 20 уровней по вертикали. Для описания процессов подсеточного масштаба применялись алгоритмы, разработанные консорциумом по региональному прогнозу погоды ALADIN/LACE.

Внедрение модели ПЛАВ в качестве основного численного метода глобального среднесрочного прогноза погоды в Гидрометцентре России в начале 2010 года позволило примерно в два раза сократить отставание России, по сравнению с лидирующей группой мировых прогностических центров, в ошибках прогноза давления на уровне моря, температуры на уровне 850 гПа, высоты поверхности 500 гПа и других параметров.

В данной статье мы приводим краткое описание модели и ее усовершенствований, выполненных в последнее десятилетие, эволюцию ошибок прогнозов, а также обсуждаем некоторые направления ее развития.

1. Динамическое ядро модели ПЛАВ

Вычислительные ресурсы, доступные в Гидрометцентре России, всегда существенно уступали ресурсам ведущих зарубежных центров, поэтому главной задачей при разработке модели ПЛАВ ставилось достижение максимальной точности прогноза при минимальных вычислительных затратах. Такой подход, в частности, предполагает использование

максимально возможного разрешения при заданных ограничениях на время счета одного прогноза. Кроме того, представлялось желательным сохранить высокую вычислительную эффективность в максимальном возможном диапазоне разрешений, поскольку динамическое ядро предназначено для применения как в численном прогнозе погоды (среднесрочном и долгосрочном), так и в моделировании климата. С учетом областей применения модели ПЛАВ, упомянутых выше, а также ограниченности доступных вычислительных ресурсов, наш подход к построению динамического ядра основывается на следующих методах. Мы используем полуявную схему интегрирования по времени [7] и полулагранжев подход к дискретизации адвективных членов уравнений [31]. Данное сочетание позволяет использовать шаги по времени значительно больше ограничения, определяемого из условия устойчивости Куранта. Практически можно использовать шаг по времени в 3–5 раз больше, чем максимально возможный при использовании эйлеровой схемы расчета адвективных членов и/или явной схемы интегрирования по времени, однако требуется решение задачи типа Гельмгольца на каждом шаге по времени. Используется неразнесенная (несмещенная) сетка по горизонтали. Таким образом, для полулагранжевой схемы расчета адвекции необходимо вычисление только одного семейства обратных траекторий (при использовании смещенной сетки типа «С» [5] требуется три семейства траекторий). Кроме того, точность расчета траекторий на неразнесенной сетке выше, чем на разнесенной, так как обе компоненты горизонтальной скорости ветра определены в одних и тех же узлах, а следовательно, требуется меньше интерполяций.

Хорошие свойства распространения инерционно-гравитационных волн и волн Россби на неразнесенной сетке достигаются за счет использования в качестве прогностических переменных вертикальной компоненты относительной завихренности и горизонтальной дивергенции поля скорости ветра (согласно [30]). Это требует восстановления скорости горизонтального ветра из завихренности и дивергенции на каждом шаге по времени. Данная задача эффективно и с высокой точностью решается прямым обращением конечно-разностных определений относительной завихренности и дивергенции [36].

Для вычисления градиента, дивергенции и завихренности используются конечно-разностные формулы четвертого порядка. Уравнение Гельмгольца в модели ПЛАВ решается прямым методом с использованием быстрого преобразования Фурье по долготе. Метод масштабируется как минимум до нескольких тысяч ядер.

С момента внедрения первой версии модели в 2009 году в динамическом блоке был выполнен ряд усовершенствований. Главными из них были:

– внедрение гибридной вертикальной координаты, применяемой в большинстве современных моделей, вместо сигма-координаты [14];

- новый алгоритм восстановления компонент скорости ветра из завихренности и дивергенции [36];
- повышение устойчивости модели за счет ряда усовершенствований полунеявной схемы интегрирования по времени и модификаций в блоке расчета лагранжевых траекторий [15];
- реализация гибридной технологии распараллеливания MPI-OpenMP [38].

В результате этих работ, в частности, стали возможными устойчивые расчеты модели с детальным описанием стратосферы (шаг сетки по вертикали в стратосфере 500–700 м, верхняя граница модельной атмосферы на 0,035 гПа) в климатической конфигурации на десятилетия, при этом модель воспроизводит квазидвухлетние колебания зонального ветра на экваторе в стратосфере [15].

Реализованный программный комплекс модели в конфигурации с разрешением 13 км (примерно 5×10^8 узлов сетки) достиг эффективной масштабируемости вплоть до 13600 процессорных ядер (время расчета снижается вплоть до 27216 ядер) [38], что является сильным результатом, особенно для отечественных разработок.

Подробное описание динамического блока модели приведено в [11, 37].

2. Применяемые параметризации

Эффект процессов, происходящих на масштабе более мелком, чем масштаб сетки (например, глубокой конвекции), во всех гидродинамических моделях описывается с помощью известных в моделях значений термодинамических параметров атмосферы на масштабе сетки и ряда введенных из физических соображений зависимостей. Используемое в моделях описание этих процессов принято называть параметризациями.

С момента внедрения модели ПЛАВ в 2009 году блок параметризаций модели претерпел существенные изменения, главными из которых были внедрение новых, более сложных и точных алгоритмов расчета радиационных потоков, пограничного слоя атмосферы и описания микрофизических процессов в облаках неконвективного характера. Результаты этих модификаций представлены в [10, 12].

В настоящее время блок параметризаций модели ПЛАВ можно условно разделить на три основных части:

- радиационные процессы в атмосфере: применяются свободно распространяемые пакеты CLIRAD SW [21, 33] и RRTMG LW [28] для коротко- и длинноволновой радиации соответственно;
- процессы на поверхности Земли и расчет тепло- и влагообмена в почве с учетом фазовых состояний воды. Проведенные работы с этими параметризациями представлены в следующем разделе;
- описание всех остальных процессов подсеточного масштаба в атмосфере (глубокая и мелкая конвекция, планетарный пограничный слой,

гравитационно-волновое сопротивление, образование и выпадение осадков, облачность и пр.) В этих параметризациях применяются алгоритмы, которые были разработаны под руководством Ж.-Ф. Желена консорциумом по мезомасштабному прогнозу погоды ALADIN /LACE, также называемым ALARO [34]. Эти алгоритмы были адаптированы и уточнены авторами данной статьи.

Для повышения точности описания радиационных потоков в модели ПЛАВ авторами была разработана новая параметризация морских слоисто-кучевых облаков, следуя [39]. Анализ спутниковых данных показывает, что общий вклад этих облаков в среднегодовой радиационный баланс на верхней границе атмосферы в средних широтах вблизи западного побережья Африки, Австралии, Северной и Южной Америки составляет 50–70 Вт/м² [26]. Данная параметризация представлена в [13]

Другим важным усовершенствованием, внедренным в модель ПЛАВ, является параметризация, которая вычисляет температуру морского льда на основе уравнения теплового баланса на поверхности [13].

Более подробное описание алгоритмов параметризаций приведено в [11].

Внедрение новых подходов в блок параметризаций в сочетании с комплексной настройкой модели ПЛАВ, позволило достичь качественного и количественного согласия в полях среднегодовых потоков тепла на поверхности и их интегральных значений с данными реанализа ERA-Interim [22] и данными, рекомендованными IPCC. На суше в каждом узле расчетной сетки (за исключением горных регионов и ряда областей в тропиках) с ошибкой не более 1 Вт/м² достигается среднегодовой баланс потоков тепла на поверхности. В среднегодовых полях балла облачности, осадков, приземного ветра и давления отмечены значимые улучшения. Это позволяет проводить эксперименты с моделью на климатических временных масштабах [13], в том числе в рамках совместной модели атмосфера – океан – морской лед, представленной в [23].

3. Подстилающая поверхность и процессы в почве в модели ПЛАВ

Важную роль в качестве прогнозов приземной температуры и влажности играет описание процессов на подстилающей поверхности, в почве и их взаимодействие с атмосферой. Из мировой практики известно, что не меньшее значение имеет задание начальных значений для температуры, влагосодержания почвы и водного эквивалента снежного покрова.

В оперативных версиях глобальной модели атмосферы ПЛАВ для среднесрочного и долгосрочного прогнозов погоды пока используется схема подстилающей поверхности ISBA-2L [29] с учетом процессов замерзания и таяния [19]. Она описывает взаимодействие в системе почва – растительность – атмосфера. По сравнению с современными моделями, схема ISBA-2L достаточно простая: в ней растительность представлена

одним слоем и двумя видами. Начальные данные влажности почвы для этой схемы подготавливаются методом оптимальной интерполяции с использованием наземных приземных наблюдений [1]. Инициализация полей влагосодержания почвы с помощью такого подхода имеет недостатки. Например, коэффициенты и эмпирические функции коррекции, используемые в методе, получены из ограниченного набора симуляций с применением одноклоночной версии схемы почвы. Такой подход требует пересмотра коэффициентов и функций при любом изменении описания подстилающей поверхности и области ее применения. Более универсальными являются методы, основанные на фильтрации Калмана [24]. Они могут применяться совместно с различными моделями почвы и видами наблюдений, не требуя при этом существенной перекалибровки.

В 2017 году были проведены эксперименты с инициализацией влажности почвы для модели ПЛАВ методом упрощенного расширенного фильтра Калмана (SEKF), где для описания подстилающей поверхности использовалась схема ISBA-2L. В [3] показано, что применение нового подхода позволяет уменьшить ошибки прогноза приземной температуры и относительной влажности по сравнению с методом оптимальной интерполяции. Однако вычислительная стоимость интеграции SEKF и полной модели атмосферы ПЛАВ высока для оперативного использования, также при этом теряется часть данных из-за невыполнения условия линейной взаимосвязи изменений влажности почвы и приземных характеристик. Для устранения этих недостатков в 2018 году была создана «усеченная» версия модели ПЛАВ, где для расчета полной эволюции состояния почвы и расчета приземных характеристик используется сохраненная на каждом шаге по времени траектория в фазовом пространстве контрольного варианта модели ПЛАВ. Численные эксперименты показали, что использование такой версии модели снижает вычислительную стоимость инициализации влажности почвы и улучшает прогноз приземных характеристик (температуры и влажности) по сравнению с обычной версией модели.

Универсальность SEKF позволяет его применить к подготовке стартовых данных для включенной в 2016 году в модель ПЛАВ многослойной модели почвы ИВМ РАН [2, 4]. Эта модель почвы имеет 8 слоев по глубине и основана на решении уравнения теплопроводности и подходе Филиппа и де Фриса. Использование совместного описания диффузии тепла и влаги в почве под воздействием градиента температуры и водного потенциала в ненасыщенном грунте позволило сделать модель почвы более реалистичной и убрать фиктивные источники и стоки тепла и влаги, неизбежные при релаксации температуры глубинного слоя почвы к климатическим данным. Влажность деятельного слоя является одним из основных источников предсказуемости долгосрочного прогноза погоды, поэтому описываемая технология будет прежде всего применена для соответствующей версии модели ПЛАВ.

Использование SEKF также позволяет расширить набор типов наблюдений, усваиваемых для инициализации полей влажности почвы.

Так, недавно были выполнены численные эксперименты по усвоению индекса влажности почвы, полученного по данным зондирования инструмента ASCAT (группа спутников METOP-A, METOP-B) вместо приземных наблюдений. Предварительные оценки не показали значимого улучшения прогноза приземной температуры и относительной влажности по сравнению с методом оптимальной интерполяции для приземных наблюдений, однако работы в этом направлении продолжаются.

4. Версии модели ПЛАВ для среднесрочного и долгосрочного прогноза

В 2010 году была внедрена первая оперативная версия модели ПЛАВ, получившая наименование ПЛАВ2008. Она имела горизонтальное разрешение $0,9 \times 0,72$ градуса по долготе и широте соответственно, 28 сигма-уровней по вертикали. Параметризация коротко- и длинноволновой радиации рассматривала весь соответствующий участок спектра как один диапазон, параметризация микрофизических процессов отсутствовала.

С весны 2016 года оперативный вариант модели ПЛАВ20 для среднесрочного прогноза погоды имеет горизонтальное разрешение $0,225^\circ$ по долготе, по широте применяется переменное разрешение: от $0,24^\circ$ в Южном полушарии до $0,16^\circ$ в Северном полушарии (разрешение над территорией России около 20 км). Эта версия модели имеет 51 уровень по вертикали.

В 2016 году была реализована единая для всех заблаговременностей прогноза программная реализация модели ПЛАВ, что позволило существенно ускорить проведение работ по ее совершенствованию и верификации. Конфигурации для среднесрочного и долгосрочного прогнозов погоды сейчас отличаются характеристиками сетки, шагом по времени и значениями некоторых параметров, регулирующих работу отдельных параметризаций. Таким образом, ПЛАВ может быть отнесена к классу бесшовных моделей [12].

В настоящее время ведется отладка новой версии модели ПЛАВ для среднесрочного прогноза погоды с горизонтальным разрешением 6×12 км, 104 вертикальными гибридными уровнями. Как и в оперативном варианте модели, в новой версии применяется переменное разрешением по широте.

Для оперативного долгосрочного прогноза погоды от месяца до сезона пока применяется модель ПЛАВ с горизонтальным разрешением $1,40625^\circ$ по долготе, $1,125^\circ$ по широте и 28 уровнями по вертикали. Версия для долгосрочного прогноза погоды к настоящему моменту сильно устарела. На смену ей подготовлена и внедряется новая версия модели ПЛАВ для бесшовного прогноза [12] с горизонтальным разрешением $0,9 \times 0,72$ градуса по долготе и широте соответственно, 96 уровнями по вертикали, которая успешно апробирована [13] на климатических расчетах.

5. Результаты усовершенствований модели

Развитие и усовершенствование модели в последнее десятилетие приводило к уменьшению ошибок среднесрочного прогноза. В [10, 12] приведена эволюция среднеквадратических ошибок оперативной версии модели ПЛАВ. На рис. 1–3 представлена эволюция осредненного за 12 месяцев (скользящее среднее) коэффициента корреляции аномалий прогнозов на 72 ч полей геопотенциала на уровнях 500 гПа (рис. 1) и 250 гПа (рис. 2), а также давления на уровне моря (рис. 3) за период 2012–2019 гг. для внетропической части Северного полушария для модели ПЛАВ и моделей ведущих центров по данным [40]. Стартовые данные соответствовали 12 ч ВСВ.

На рис. 1–3 видно, что за период с 2012 года по настоящее время коэффициенты корреляции аномалий росли. Это связано не только с развитием модели ПЛАВ, но и с переходом в 2013 г. расчета оперативных прогнозов на новый объективный анализ [16]. Некоторый провал в конце 2016 г. объясняется технологическими проблемами, в частности отсутствием начальных данных температуры поверхности океана, снега и концентрации морского льда ввиду их более позднего поступления. Можно отметить резкий рост коэффициента корреляции аномалий для геопотенциала на поверхностях 500 и 250 гПа в конце 2017 г. после внедрения всех упомянутых выше усовершенствований динамического ядра и параметризаций, а также их комплексной настройки. Для этих полей можно констатировать двукратное сокращение отставания от основной группы прогностических центров в период с 2012 по 2019 год.

6. Планы развития модели

Ближайшие планы развития модели ПЛАВ связаны с настройкой новой версии модели с разрешением 6–12 км, наладкой и внедрением блока усвоения влагосодержания почвы на основе SEKF [3], совместном с многослойной моделью почвы [2], представленного в разделе 3. Также предполагается внедрить в модель усовершенствованное описание процессов глубокой конвекции и стохастическое описание облачности для расчета радиационных потоков.

Горизонтальное разрешение систем глобального среднесрочного прогноза погоды ведущих мировых центров в настоящее время составляет 7–9 км. Рост доступных вычислительных ресурсов в скором времени даст возможность использовать и более подробные сетки. Таким образом, дальнейшие планы связаны с разработкой нового динамического блока с разрешением 3–5 км. Однако построение глобальных моделей с шагом сетки менее 10 км путем простого масштабирования существующих моделей невозможно, так как возникает ряд проблем.

Гидростатическое приближение по вертикали не является достаточно точным для воспроизведения мезомасштабных явлений на сетке с шагом

менее 10 км по горизонтали (см., например, [35]). В настоящее время в ведущих мировых прогностических центрах ведется разработка глобальных моделей атмосферы высокого разрешения, основанных на негидростатических уравнениях сжимаемой атмосферы [25, 27], готовится [20] или уже осуществлен переход к использованию таких моделей в оперативном прогнозе [41].

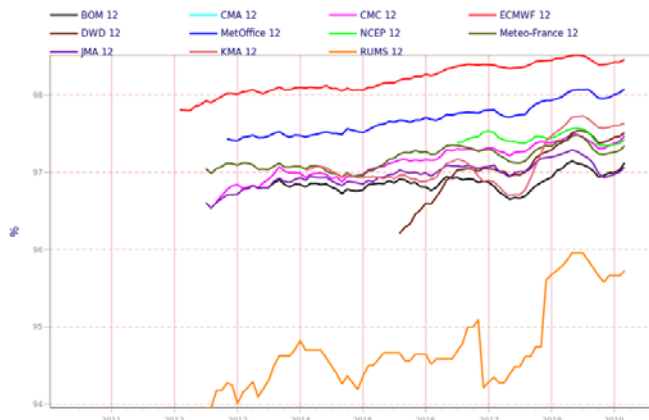


Рис. 1. Изменение коэффициента корреляции аномалий прогноза для высоты поверхности 500 гПа на 72 ч в период 2012–2019 гг. в модели ПЛАВ (оранжевая линия), модели ЕЦСПП (красная линия), модели метеослужбы Великобритании (синяя линия), по данным [40]. Внетропическая часть Северного полушария. Скользящее среднее за 12 месяцев.

Fig. 1. Evolution of anomalies correlation coefficient of 72h forecast for 500 hPa surface height in 2012-2019 in SLAV model (orange line), in ECMWF model (red line), UK MetOffice model (blue line), from [40]. Extratropical part of the Northern Hemisphere. Moving average for 12 months.

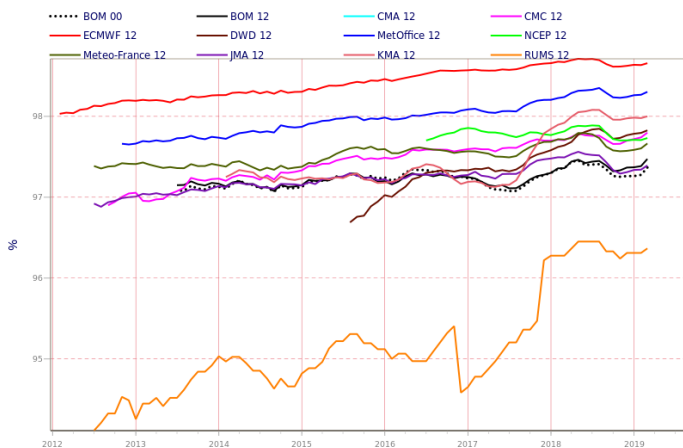


Рис. 2. То же, что на рис. 1, но для высоты поверхности 250 гПа.
Fig. 2. Idem as in Fig. 1 but for 250 hPa surface height field.

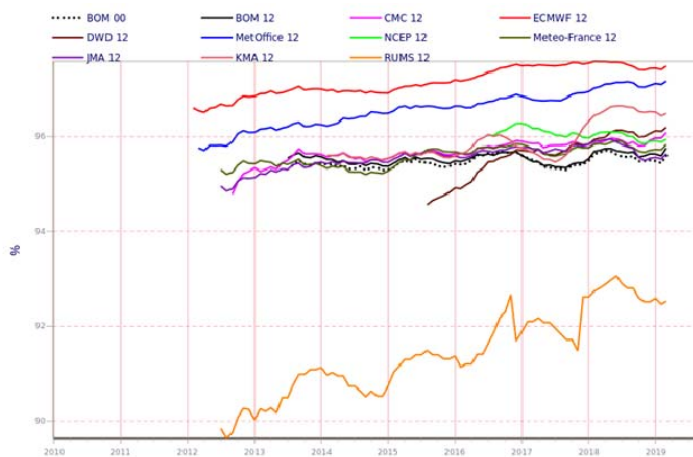


Рис. 3. То же, что на рис. 1, но для поля давления на уровне моря.
Fig. 3. Idem as in Fig.1 but for mean sea level pressure field.

Вторая проблема заключается в том, что в регулярной широтно-долготной сетке меридианы сходятся к полюсам, что приводит к чрезмерному измельчению шага сетки по долготе и очень жесткому условию Куранта на шаг по времени при использовании явных методов интегрирования. В [32] рассматривается большое количество альтернативных сеток на сфере. Наиболее популярными вариантами являются:

- икосаэдральная сетка с треугольными или шестиугольными (и несколькими пятиугольными) ячейками;
- сетка кубическая сфера, полученная центральной проекцией с грани куба на сферу, с четырехугольными ячейками;
- сетка Инь-Янь, состыкованная из двух регионов регулярной широтно-долготной сетки без полярных областей;
- редуцированная широтно-долготная сетка, в которой точки расположены на регулярных широтах, а разрешение по долготе огрубляется при приближении к полюсам.

Согласно результатам работы [32], ни одна из возможных сеток не является идеальным вариантом, каждая имеет свои особенности и недостатки. Сетка кубическая сфера используется в перспективной модели метеослужб США [20] и Великобритании [27], сетка Инь-Янь – в модели канадской службы по охране окружающей среды. Икосаэдральная сетка применяется в модели ICON метеослужбы Германии [41]. Редуцированная широтно-долготная сетка применяется в перспективной модели ЕЦ-СПП [25] по причинам совместимости с существующим программным комплексом, который работает на редуцированной широтно-долготной сетке.

С учетом тенденций развития вычислительных систем (повышения производительности практически исключительно за счет увеличения

числа процессоров) применяемые вычислительные методы должны эффективно масштабироваться на 10^4 – 10^6 вычислительных ядер [18].

В ИВМ РАН и Гидрометцентре России на основе модели ПЛАВ разрабатывается глобальный негидростатический динамический блок модели атмосферы с целевым горизонтальным разрешением 3–5 км. Он будет основан на полных, сжимаемых уравнениях атмосферы. С учетом доступных и ожидаемых вычислительных ресурсов выбраны методы, позволяющие использовать максимальный шаг по времени и эффективно масштабирующиеся до нескольких десятков тысяч вычислительных ядер. Предполагается, что модель будет использовать либо полулагранжево, либо Эйлерово представление адвекции. Схема интегрирования по времени планируется полуневьяная, с неявным интегрированием быстрых волновых слагаемых уравнений по горизонтали и вертикали. Трехмерная эллиптическая задача будет решаться с помощью масштабируемого многосеточного алгоритма. Планируется использование сетки типа кубическая сфера, с возможностью локального увеличения разрешения типа «нестинг» (дробление ячеек).

Заключение

Мы представили обзор работ последнего десятилетия по развитию глобальной модели атмосферы ПЛАВ. Самым существенным результатом, пожалуй, является успешное применение модели в настоящее время для широкого диапазона временных масштабов. Результаты модели ПЛАВ в среднесрочном прогнозе могут быть лучше уже сейчас в случае более совершенных начальных данных, как показано в [12]. Для дальнейшего повышения качества прогнозов реализована и отлаживается версия модели с повышенным разрешением, совершенствуются параметризации процессов подсеточного масштаба, а также ведется разработка динамического ядра модели следующего поколения. Также ведется настройка оперативной технологии ансамблевых среднесрочных прогнозов на основе модели ПЛАВ и локального ансамблевого фильтра Калмана с преобразованием ансамбля, где ранее были получены обнадеживающие результаты [8].

Работа выполнена при частичной поддержке проекта РФФИ 17-05-01227.

Список литературы

1. Богословский Н.Н., Толстых М.А. Реализация схемы усвоения для почвенных переменных в глобальной полулагранжевой модели прогноза погоды // Вычислительные технологии. 2006. Т.11. Спецвыпуск. Ч. 3. С. 20-25.
2. Володин Е.М., Лыков В.Н. Параметризация процессов тепло- и влагообмена в системе растительность – почва для моделирования общей циркуляции атмосферы. 1. Описание и расчеты с использованием локальных данных // Известия РАН. ФАО. 1998. Т. 34, № 4. С. 453-465.
3. Махнорылова С.В., Толстых М.А. Усвоение косвенных данных о влагосодержании почвы методом упрощенного расширенного фильтра Калмана в модели среднесрочного прогноза ПЛАВ // Метеорология и гидрология. 2017. № 6. С. 55-67.

4. Махнорылова С.В., Толстых М.А. Инициализация влагосодержания деятельного слоя подстилающей поверхности для многослойной параметризации почвы в глобальной модели атмосферы ПЛАВ // Международная конференция и школа молодых ученых по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде CITES 2019: труды конференции. М., 2019. С. 196-199.
5. Мезингер Ф., Аракава А. Численные методы, используемые в атмосферных моделях. Т.1. Л.: Гидрометеоздат, 1979. 89 с.
6. Наставление по Глобальной системе обработки данных и прогнозирования. Дополнение IV к Техническому регламенту ВМО // ВМО-№ 485. 2017. 161 с. https://meteoinfo.ru/images/media/books-docs/WMO/485_ru.pdf
7. Робер А. Полуявный метод // Численные методы, используемые в атмосферных моделях. Т.2. Л.: Гидрометеоздат, 1982. С. 302-315.
8. Розутов В.С., Толстых М.А., Мизяк В.Г. Система ансамблевого прогноза на основе локального ансамблевого фильтра Калмана // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 364. С. 5-19.
9. Толстых М.А. Полулагранжева модель атмосферы с высоким разрешением для численного прогноза погоды // Метеорология и гидрология. 2001. № 4. С. 5-16.
10. 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.
11. Толстых М.А., Шашкин В.В., Фадеев Р.Ю., Шляева А.В., Мизяк В.Г., Розутов В.С., Богословский Н.Н., Гойман Г.С., Махнорылова С.В., Юрова А.Ю. Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза. М.: Триада лтд. 2017. 166 с.
12. Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Гойман Г.С., Зарипов Р.Б., Киктев Д.Б., Махнорылова С.В., Мизяк В.С., Розутов В.С. Многомасштабная глобальная модель атмосферы ПЛАВ: результаты среднесрочных прогнозов погоды // Метеорология и гидрология. 2018. № 11. С. 90-99.
13. Фадеев Р.Ю., Толстых М.А., Володин Е.М. Климатическая версия модели атмосферы ПЛАВ: разработка и первые результаты // Метеорология и гидрология. 2019. № 1. С. 22-35.
14. Шашкин В.В., Толстых М.А., Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н. Версия модели атмосферы ПЛАВ в гибридной системе координат по вертикали // Метеорология и гидрология. 2017. № 9. С. 24-35.
15. Шашкин В.В., Толстых М.А., Володин Е.М. Моделирование циркуляции стратосферы полулагранжевой моделью атмосферы ПЛАВ // Метеорология и гидрология. 2019. № 1. С. 5-21.
16. Цырульников М.Д., Свиренко П.И., Гайфулин Д.Р., Горбунов М.Е., Багров А.Н. Новая технология циклического усвоения данных на основе схемы анализа 3D-var // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2016. Информационный сборник № 43. С. 3-12.
17. Bates J.R., Li Yong, Brandt A., McCormick S.F., Ruge J. A global shallow-water numerical model based on the semi-Lagrangian advection of potential vorticity // Quart. J. Roy. Met. Soc. 1995. Vol. 121. P. 1981-2006.
18. Bauer P., Thorpe A., Brunet G. The quiet revolution of numerical weather prediction // Nature. 2015. Vol. 525. P. 48-55.
19. Boone A., Masson V., Meyers T., Noilhan J. The influence of the inclusion of soil freezing on simulations by a soil-vegetation-atmosphere transfer scheme // J. Appl. Meteor. 2000. Vol. 9. P. 1544-1569.
20. Chen J.-H., Lin S.-J., Magnusson L., Bender M., Xi Chen, Zhou L., Xiang B., Rees S., Morin M., Harris L. Advancements in hurricane prediction with NOAA's next generation forecast system // Geophys. Res. Lett. 2019. Vol. 46, no. 8. P. 4495-4501.
21. Chou, M.-D., Suarez M. J. A solar radiation parameterization (CLIRAD-SW) for atmospheric studies // NASA Tech. Memo NASA/TM-1999-10460, Vol. 15. MD. 48 p.
22. ERA-Interim: Global Atmospheric Reanalysis from 1979. <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/archive-datasets/reanalysisdatasets/era-interim>.
23. Fadeev R.Yu., Ushakov K.V., Tolstykh M.A., Ibrayev R.A. Design and development of the SLAV-INMIO-CICE coupled model for seasonal prediction and climate research // Russ. J. Numer. An. Math. Mod. 2018. Vol. 33, no. 6. P. 333-340.
24. Fairbairn D., Barbu A.L., Mahfouf J.-F., Calvet J.-C., Gelati E. Comparing the Ensemble and Extended Kalman Filters for in situ soil moisture assimilation with contrasting soil conditions. // Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. 2015. Vol. 12. P. 7353-7403.
25. Kühnlein C., Deconinck W., Klein R., Malardel S., Piotrowski Z. P., Smolarkiewicz P. K., Szmelter J., Wedi N. P. FVM 1.0: a nonhydrostatic finite-volume dynamical core for the IFS // Geosci. Model Dev. 2019. Vol. 12. P. 651-676.
26. Loeb N.G., Wielicki B.A., Doelling D.R., Smith G.L., Keyes D.F., Kato S., Manalo-Smith N., Wong Takmeng. Toward optimal closure of the Earth's top-of-atmosphere radiation budget // J. Climate. 2009. Vol. 22. P. 748-766.

27. Melvin T., Benacchio T., Shipway B., Wood N., Thuburn J., Cotter C. A mixed finite-element, finite-volume, semi-implicit discretization for atmospheric dynamics: Cartesian geometry // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 2019. Vol. 145. P. 1-19.
28. 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, no. 16. P. 16.663-16.682.
29. Noilhan J., Mahfouf J.-F. The ISBA land surface parameterization scheme // *Global Planet. Change.* 1996. Vol. 13, no. 1-4. P. 145-159.
30. Randall D. A. Geostrophic adjustment and the finite-difference shallow water equations // *Mon. Wea. Rev.* 1991. Vol. 122. P. 1371-1377.
31. Staniforth A., Côté J. Semi-Lagrangian integration schemes for atmospheric models – A review // *Mon. Wea. Rev.* 1991. Vol. 119. P. 2206-2223.
32. Staniforth A., Thuburn J. Horizontal grids for global weather and climate prediction models: a review // *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 2012. Vol. 138. P. 1-26.
33. Tarasova T., Fomin B. The Use of New Parameterizations for Gaseous Absorption in the CLIRAD-SW Solar Radiation Code for Models // *J. Atmos. and Oceanic Techn.* 2007. Vol. 24, no. 6. P. 1157-1162.
34. Termonia P., Fischer C., Bazile E., Bouyssel F., Brozková R., Bénard P., Bochenek B., Degrauwe D., Derková M., Khatib R. E., Hamdi R., Mašek J., Pottier P., Pristov N., Seity, Y., Smoliková P., Španiel O., Tudor M., Wang Y., Wittmann C., Joly A. The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1 // *Geosci. Mod. Devel.* 2018. Vol. 11. P. 257-281.
35. Thuburn J. Some basic dynamics relevant to the design of atmospheric model dynamical cores // *Numerical Techniques for Global Atmospheric Models.* Springer, 2011. 564 p.
36. Tolstykh M., Shashkin V. Vorticity-divergence mass-conserving semi-Lagrangian shallow-water model using the reduced grid on the sphere // *J. Comput. Phys.* 2012. Vol. 231. P. 4205-4233.
37. 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.
38. Tolstykh M., Goyman G., Fadeev R., Shashkin V., Lubov S. SL-AV model: numerical weather prediction at extra-massively parallel supercomputer // *Communications in Computer and Information Science (Russian Supercomputer days 2018).* Springer, 2019. Vol. 965. P. 379-387.
39. Wood R. Stratocumulus Clouds // *Mon. Wea. Rev.* 2012. Vol. 120. P. 2373-2423.
40. World Meteorological Organization Lead Centre for Deterministic Forecast Verification. http://apps.ecmwf.int/wmolednvscores/time_series/msl
41. Zangl G., Reinert D., Ripodas P., Baldauf M. The ICON (ICOSahedral Nonhydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core // *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 2015. Vol. 141. P. 563-579.

References

1. Bogoslovskii N.N., Tolstykh M.A. Implementation of assimilation scheme for soil variables in the global semi-Lagrangian NWP model. *Vychislitel'nye tekhnologii [Computational Technologies]*, 2006, vol. 11, Special issue, no. S7, pp. 20-25 [in Russ.].
2. Volodin E.M., Lykosov V.N. Parametrizatsiya protsessov teplo- i vlagoobmena v sisteme rastitel'nost' – pochva dlya modelirovaniya obschey tsirkulyatsii atmosfery. 1. Opisaniye i raschety s ispol'zovaniem lokal'nyh dannyh [Parameterization of Heat and Moisture Processes in Soil-Vegetation System. 1. Description and Calculations Using Local Observational Data]. *Izvestiya RAN. FAO [Ev., Atmos. Oceanic Phys.]*, 1998, vol. 34, no. 4, pp. 453-465 [in Russ.].
3. Makhnorylova S.V., Tolstykh M.A. A Simplified Extended Kalman Filter assimilation of soil moisture for the SL-AV global medium-range forecast model. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2017, vol. 42, no. 6, pp. 394-402. DOI: 10.3103/S106837391706005X.
4. Makhnorylova S.V., Tolstykh M.A. Initsializatsiya vlagosoderzhaniya deyatel'nogo sloya podstilyayushey poverhnosti dlya mnogosloynoy parametrizatsii pochvy v global'noy modeli atmosfery PLAV [Soil moisture initialization for use in multilayer soil model of the global weather prediction system SL-AV]. International Young Scientists School and Conference on Computational Information Technologies for Environmental Sciences, CITES-2019: Conference proceedings. – Tomsk, 2019, pp. 196-199 [in Russ.].
5. Mezinger F., Arakava A. Chislennyye metody, ispol'zuemye v atmosferykh modelyakh. Vol. 1. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1979, 89 p. [in Russ.]. *Mesinger F., Arakawa A.* Numerical methods used in atmospheric models. Vol. 1 (GARP Publications Series No. 17, ICSU/WMO, Geneva, 1979).
6. WMO Manual on the Global Data-processing and Forecasting System. Volume 1 (Annex IV to WMO Technical Regulations). *WMO-No. 485*, Updated in 2017, 161 p.
7. Rober A. Poluneayavnyy metod. Chislennyye metody, ispol'zuemye v atmosferykh modelyakh. Vol. 2. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1982, pp. 302-315 [in Russ.]. *Rober A.* Semi-implicit method. In: Numerical methods used in atmospheric models. Vol. 2 (GARP Publications Series No. 17, ICSU/WMO, Geneva, 1979).

8. Rogutor V.S., Tolstykh M.A., Mysiak V.G. Ensemble forecast system based on Kalman local ensemble filter. *Trudy Gidrometsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 364, pp. 5-19 [in Russ.].
9. Tolstykh M.A. Semi-Lagrangian High-Resolution Model of the Atmosphere for Numerical Weather Prediction. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2001, no. 4, pp. 1-9.
10. Tolstykh M.A., Geleyn J.-F., Volodin E. M., Bogoslovskii N. N., Vilfand R. M., Kiktev D. B., Krasjuk T. V., Kostykin S. V., Mizyak 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. DOI: 10.3103/S1068373915060035.
11. Tolstykh M.A., Shashkin V.V., Fadeev R.Yu., Shlyayeva A.V., Mizyak V.G., Rogutor V.S., Bogoslovskii N.N., Goyman G.S., Mahnorylova S.V., Yurova A.Yu. Sistema modelirovaniya atmosfery dlya besshovnogo prognoza [Atmosphere modelling system for seamless prediction]. Moscow, Triada LTD publ., 2017, 166 p. [in Russ.].
12. Tolstykh M.A., Fadeev R.Yu., Shashkin V.V., Goyman G.S., Zaripov R.B., Kiktev D.B., Makhnorylova S.V., Mizyak V.G., Rogutor V.S. Multiscale Global Atmosphere Model SL-AV: the Results of Medium-range Weather Forecasts. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2018, vol. 43, no. 11, pp. 773-779. DOI: 10.3103/S1068373918110080.
13. Fadeev R.Yu., Tolstykh M.A., Volodin E.M. Climate Version of the SL-AV Global Atmospheric Model: Development and Preliminary Results. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2019, vol. 44, no. 1, pp. 13-22. DOI: 10.3103/S1068373919010023.
14. Shashkin V.V., Tolstykh M.A., Ivanova A.R., Skriptunova E.N. SL-AV atmospheric model version using σ -p hybrid vertical coordinates. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2017, vol. 42, no. 9, pp 554–563. DOI: 10.3103/S1068373917090023.
15. Shashkin V.V., Tolstykh M.A., Volodin E.M. Stratospheric Circulation Modeling with the SL-AV Semi-Lagrangian Atmospheric Model. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2019, vol. 44, no. 1, pp. 1-12. DOI: 10.3103/S1068373919010011.
16. Tsyryul'nikov M.D., Svirenko P.I., Gayfulin D.R., Gorbunov M.E., Bagrov A.N. Novaya tekhnologiya tsiklicheskogo usvoeniya dannyh na osnovе skhemy analiza 3D-var [New technology for cyclic data assimilation based on 3D-var analysis scheme]. Rezul'taty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov. Informatsionnyy sbornik, 2016, no. 43, pp. 3-12 [in Russ.].
17. Bates J.R., Li Yong, Brandt A., McCormick S.F., Ruge J. A global shallow-water numerical model based on the semi-Lagrangian advection of potential vorticity. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 1995, vol. 121, pp. 1981-2006.
18. Bauer P., Thorpe A., Brunet G. The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature*, 2015, vol. 525, pp. 48-55.
19. Boone A., Masson V., Meyers T., Noilhan J. The influence of the inclusion of soil freezing on simulations by a soil-vegetation-atmosphere transfer scheme. *J. Appl. Meteor.*, 2000, vol. 9, pp. 1544-1569.
20. Chen J.-H., Lin S.-J., Magnusson L., Bender M., Xi Chen, Zhou L., Xiang B., Rees S., Morin M., Harris L. Advancements in hurricane prediction with NOAA's next generation forecast system. *Geophys. Res. Lett.*, 2019, vol. 46, no. 8, pp. 4495-4501.
21. Chou, M.-D., Suarez M. J. A solar radiation parameterization (CLIRAD-SW) for atmospheric studies. *NASA Tech. Memo NASA/TM-1999-10460*, Vol. 15, MD, 48 p.
22. ERA-Interim: Global Atmospheric Reanalysis from 1979. Available at: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/archive-datasets/reanalysisdatasets/era-interim>.
23. Fadeev R. Yu., Ushakov K. V., Tolstykh M. A., Ibrayev R. A. Design and development of the SLAV-INMIO-CICE coupled model for seasonal prediction and climate research. *Russ. J. Numer. An. Math. Mod.*, 2018, vol. 33, no. 6, pp. 333-340.
24. Fairbairn D., Barbu A.L., Mahfouf J.-F., Calvet J.-C., Gelati E. Comparing the Ensemble and Extended Kalman Filters in situ soil moisture assimilation with contrasting soil conditions. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 2015, vol. 12, pp. 7353-7403.
25. Kühnlein C., Deconinck W., Klein R., Malardel S., Piotrowski Z. P., Smolarkiewicz P. K., Szmelter J., Wedi N. P. FVM 1.0: a nonhydrostatic finite-volume dynamical core for the IFS. *Geosci. Model Dev.* 2019, vol. 12, pp. 651–676.
26. Loeb N.G., Wielicki B.A., Doelling D.R., Smith G.L., Keyes D.F., Kato S., Manalo-Smith N., Wong Takmeng. Toward optimal closure of the Earth's top-of-atmosphere radiation budget. *J. Climate*, 2009, vol. 22, pp. 748-766.
27. Melvin T., Benacchio T., Shipway B., Wood N., Thuburn J., Cotter C. A mixed finite-element, finite-volume, semi-implicit discretization for atmospheric dynamics: Cartesian geometry. *Quart. J. Roy. Meteorol Soc.*, 2019, vol. 145, pp. 1-19.

28. 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.
29. Noilhan J., Mahfouf J.-F. The ISBA land surface parameterization scheme. *Global Planet. Change*, 1996, vol. 13, N1-4, pp.145–159.
30. Randall D. A. Geostrophic adjustment and the finite-difference shallow water equations. *Mon. Wea. Rev.*, 1991, vol. 122, pp. 1371-1377.
31. Staniforth A., Côté J. Semi-Lagrangian integration schemes for atmospheric models -- A review. *Mon. Wea. Rev.*, 1991, vol. 119, pp. 2206-2223.
32. Staniforth A., Thuburn J. Horizontal grids for global weather and climate prediction models: a review. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 2012, vol. 138, pp. 1–26.
33. Tarasova T., Fomin B. The Use of New Parameterizations for Gaseous Absorption in the CLIRAD-SW Solar Radiation Code for Models. *J. Atmos. and Oceanic Techn.*, 2007, vol. 24, no. 6, pp. 1157–1162.
34. Termonia P., Fischer C., Bazile E., Bouysse F., Brozková R., Bénard P., Bochenek B., Degrauwe D., Derková M., Khatib R. E., Hamdi R., Mašek J., Pottier P., Pristov N., Seity, Y.; Smolikhová P., Španiel O., Tudor M., Wang Y., Wittmann C., Joly A. The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1. *Geosci. Mod. Devel.*, 2018, vol. 11, pp. 257-281.
35. Thuburn J. Some basic dynamics relevant to the design of atmospheric model dynamical cores /in Numerical Techniques for Global Atmospheric Models, eds. P. Lauritzen, C. Jablonowski, M. Taylor, R. Nair. 2011, Springer, 564 pp.
36. Tolstykh M., Shashkin V. Vorticity–divergence mass-conserving semi-Lagrangian shallow-water model using the reduced grid on the sphere. *J. Comput. Phys.* 2012, vol.231, pp.4205-4233.
37. 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.
38. Tolstykh M., Goyman G., Fadeev R., Shashkin V., Lubov S. SL-AV model: numerical weather prediction at extra-massively parallel supercomputer. In: Communications in Computer and Information Science (Russian Supercomputer days 2018). Springer, 2019, vol. 965, pp. 379-387. ISBN 978-3-030-05807-4.
39. Wood R. Stratocumulus Clouds. *Mon. Wea. Rev.* 2012, vol. 120, pp. 2373-2423.
40. World Meteorological Organization Lead Centre for Deterministic Forecast Verification, http://apps.ecmwf.int/wmolcdnv/scores/time_series/msl
41. Zangl G., Reinert D., Ripodas P., Baldauf M. The ICON (ICOsahedral Nonhydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 2015, vol. 141, pp. 563–579.

Поступила в редакцию 11.11.2019 г.

Received by the editor 11.11.2019.