

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-1-58-72>

УДК 551.513

Развитие системы долгосрочного прогноза Гидрометцентра России в 2020 году

***Р.Ю. Фадеев^{2,1,3}, В.В. Шашкин^{2,1}, М.А. Толстых^{1,2,3}, С.В. Травова¹
В.Г. Мизяк¹, В.С. Рогутов¹, К.А. Алипова¹***

*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*

Приводится краткое описание работ, выполненных в 2020 году по реализации технологии расчетов долгосрочных прогнозов на основе многомасштабной гидродинамической модели атмосферы ПЛAV072L96. Эти работы направлены на улучшение воспроизведения процессов глубокой конвекции и динамики стратосферы.

Работы включали совершенствование и проверку параметризаций процессов подсеточного масштаба и модели в целом на основе расчетов ретроспективных долгосрочных прогнозов. В результате в модели правильно воспроизводятся основные характеристики поля среднегодовых осадков и среднезонального ветра в стратосфере.

Ключевые слова: долгосрочные прогнозы, глобальная модель атмосферы, параметризации процессов подсеточного масштаба

Development of the long-range forecast system at Hydrometcentre of Russia in 2020

***R.Yu. Fadeev^{2,1,3}, V.V. Shashkin^{2,1}, M.A. Tolstykh^{1,2,3}, S.V. Travova¹,
V.G. Mizyak¹, V.S. Rogurov¹, K.A. Alipova¹***

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

A brief description is given for the works carried out in 2020 to implement the long-range forecast technology based on the SLAV072L96 multiscale hydrodynamic atmosphere model. The purpose of these works was an improvement in simulating the deep convection and stratosphere dynamics.

The works comprised the improvement and verification of the parameterizations for subgrid-scale processes and the whole model using long-range forecasts computed from historical initial data. As a result, the model correctly reproduces the main features of the annual mean precipitation field and zonal mean wind in the stratosphere.

Keywords: long-range forecasts, global atmosphere model, parameterizations of subgrid-scale processes

Введение

В последние годы в Гидрометцентре России ведется работа по реализации оперативной технологии долгосрочного прогноза на основе многомасштабной модели общей циркуляции атмосферы ПЛАВ, подробно представленной в [3]. Разрешение применяемой версии модели ПЛАВ072L96 составляет $0,9 \times 0,72$ градуса по долготе и широте, 96 уровней по вертикали (верхний уровень около 0,03 гПа). По сравнению с [3], в модель было добавлено описание сопротивления неорографических гравитационных волн [14]. Для этой версии ранее было исследовано качество воспроизведения современного климата [5], а также воспроизведения динамики стратосферы [6]. Были также получены предварительные оценки качества сезонных прогнозов по этой версии модели [4], показавшие улучшение качества воспроизведения атмосферной циркуляции на сезонном масштабе по сравнению со старой версией модели.

Известно, что тропическая конвекция и связанные с ней явления, в том числе правильное воспроизведение численной моделью отклика атмосферы на аномалии характеристик поверхности, являются одними из важнейших источников предсказуемости атмосферной циркуляции на субсезонном и сезонном масштабе [12, 15, 16]. В ряде работ, например [9] (см. также ссылки в ней), показана важная роль стратосферы в передаче прогностического сигнала из низких в средние и высокие широты.

В данной статье мы приводим описание работ, выполненных в 2020 году по реализации технологии расчетов долгосрочных прогнозов на основе данной модели, направленных на улучшение воспроизведения этих процессов. Также коротко представлены другие усовершенствования модели. Работы включали совершенствование и проверку параметризаций процессов подсеточного масштаба и модели в целом на основе многолетних ретроспективных расчетов.

1. Параметризация глубокой конвекции и осадки

Процессы глубокой конвекции во внутритропической зоне конвергенции приводят к перераспределению момента импульса в верхней тропосфере и, таким образом, влияют на характеристики струйного течения в средних широтах, от которого в значимой степени зависит погода на Европейской территории России. Глубокая конвекция является неотъемлемой частью колебания Маддена – Джулиана, которое сопровождается генерацией крупномасштабных волн Россби [22, 24]. Последующее распространение и обрушение этих волн в Северной Атлантике и Западной Европе [10, 26] модифицирует положение струйного течения в Северном полушарии, траектории атлантических циклонов и может приводить к явлениям атмосферного блокирования [12]. Показано, что такая дальняя связь является источником потенциальной предсказуемости

атмосферной циркуляции в североатлантическом регионе и западной Европе на субсезонном масштабе (10–30 дней) [23]. Недавно показана возможность модуляции этой связи явлением Эль-Ниньо – Южное колебание [16].

Для параметризованного описания процесса глубокой конвекции в ПЛАВ применяется подход, основанный на алгоритме потока массы [7, 11]. Параметризация включает описание восходящих и нисходящих потоков, воздух в которых может как вовлекаться из окружающей среды, так и выбрасываться в нее. Возникновение восходящих потоков глубокой конвекции зависит от величины крупномасштабной конвергенции влаги и локальной характеристики столба воздуха (плавучести). Характерные для глубокой конвекции сильные осадки и важная роль в перераспределении момента импульса в верхней тропосфере делают эту параметризацию своеобразным маркером качества воспроизведения макромасштабных и подсеточных характеристик атмосферы.

Диагностика уходящего в космос длинноволнового излучения и осадков на поверхности является основным способом проверки воспроизведения глубокой конвекции в модели. Необходимость проверки и настройки параметризации глубокой конвекции в модели ПЛАВ была обусловлена двумя факторами. Во-первых, наблюдались существенные ошибки в описании поля среднегодовых осадков во внутритропической зоне конвергенции в сравнении с реанализом ERA5 [13]. Во-вторых, положение центра струйного течения в Северном полушарии в зимние месяцы было неверно.

В процессе совершенствования и настройки модели ПЛАВ качество воспроизведения эффекта от процессов глубокой конвекции над сушей и водной поверхностью исследовалось отдельно. Выделение этих случаев обусловлено принципиально отличающимися характеристиками глубокой конвекции и связанных с ней процессов. В сравнении с сушей водная поверхность характеризуется малым значением параметра шероховатости, большими скоростями ветра и слабой зависимостью температуры поверхности от суточного хода. Возникновение глубокой конвекции над сушей, напротив, в существенной степени определяется скоростью прогрева поверхности в дневной период, а также способностью растений и почвы отдать достаточное количество влаги в атмосферу. Глубокая конвекция – это процесс с положительной обратной связью: она приводит к генерации прогревающих поверхность Земли облаков верхнего яруса и осадкам, которые насыщают почву влагой.

Ошибка в среднегодовом поле осадков в модели ПЛАВ до начала представленных работ выражалась в систематическом занижении осадков в Амазонии и Центральной Африке. Для исправления этой ошибки требовалась настройка не только параметризаций глубокой конвекции, пограничного слоя атмосферы, осадков и облачности, но также настройка модели многослойной почвы, блоков описания процессов на поверхности

и в растительности. Так, например, были изменены значения параметров, отвечающих за тепловосприимчивость растительности и поверхности Земли к температуре воздуха в нижней тропосфере. Таким образом, вместе с настройкой параметризации облачности удалось добиться правильного суточного хода приземной температуры в тропических лесах Амазонии и Центральной Африки.

Увеличение интенсивности осадков и предельной высоты подъема восходящего воздуха над сушей (в сезон дождей в Амазонии она может достигать значений, соответствующих 12–16 км) было достигнуто путем изменения значений ряда параметров. Эти параметры отвечают за учет интенсивности вовлечения и выбрасывания воздуха в восходящие и нисходящие потоки, влияние опускающегося воздуха в нисходящих потоках на характеристики восходящего потока, скорость испарения падающих капель и их влияние на характер перемешивания в пограничном слое атмосферы и др.

Характер ошибок в среднегодовом поле осадков над морской поверхностью в сравнении с реанализом ERA5 и, соответственно, в характере работы параметризации глубокой конвекции принципиально отличался от указанного выше. В наших экспериментах применяется предписанная эволюция характеристик океана; таким образом, температура верхнего перемешанного слоя не зависит от интенсивности осадков и характера облачности. Поэтому для устранения систематического завышения осадков во внутритропической зоне конвергенции над океаном потребовался детальный анализ и настройка практически всех параметризаций модели ПЛАВ.

На рис. 1а иллюстрируется поле интенсивности осадков (в мм/день), осредненное за 11 лет в период с 30 ноября 1993 г. по 31 ноября 2003 г. Можно видеть, что в сравнении с данными наблюдений (результаты международного проекта по изменению осадков в тропиках TRMM, рис. 1б) и реанализом ERA5 (рис. 1в) в ПЛАВ теперь отсутствует т. н. «раздвоение осадков», которое обычно выражается в виде двух характерных «полос» осадков севернее и южнее экватора при практически полном отсутствии осадков на самом экваторе. Амплитуда и положение максимумов осадков восточнее Папуа – Новая Гвинея на рис. 1а и рис. 1б, в хорошо согласуются; осадки над сушей и, в частности, в Амазонии и Центральной Африке в целом близки к наблюдаемым. Суммарные осадки на поверхности в ПЛАВ составляют величину, равную 2,73 мм/день, что отличается на 8,8 % от реанализа ERA5 (2,51 мм/день) и на 6,4 % от данных TRMM (2,67 мм/день). Модель ПЛАВ хорошо воспроизводит максимумы осадков в районах течений Куроиси и Гольфстрим, но в то же время недостаточно точно описывает узкую полосу осадков в приэкваториальной части Тихого океана, что может объясняться недостаточным горизонтальным разрешением модели.

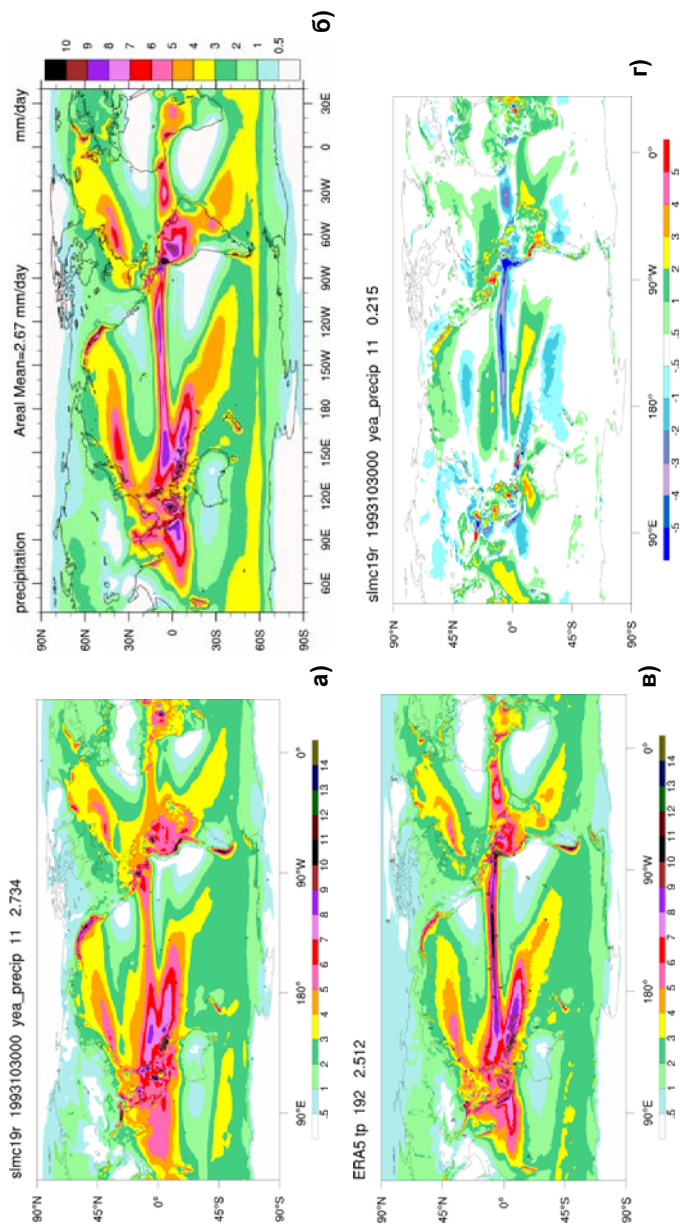


Рис. 1. Среднее за период с 1993 по 2003 г. поле осадков в модели ПЛАВ (а) и реанализе ERA5 (б). Поле осадков, рассчитанное в рамках международного проекта TRMM (в). Отклонение поля осадков в ПЛАВ от реанализа за ERA5 (г). Цветовая шкала на рисунках (а–в) одинаковая. Единицы измерения – мм/день.
Fig. 1. Precipitation fields averaged over 1991-2003 in SL-AM model (a) and ERA5 reanalysis (b). The precipitation field from TRMM experiment averaged over 1979-2010 (c). The difference between precipitation in SLAV and ERA5 (g). The color scale is the same for (a), (б), (в). Units are mm/day.

На рис. 1г иллюстрируется разница полей осадков, осредненных за один и тот же 11-летний период времени, в ПЛАВ и ERA5. На этом рисунке можно отметить занижение осадков в Индийском океане западнее Суматры и смещение максимума осадков с гор северо-западной части Южной Америки ближе к Гватемале. Смещение максимума осадков, в частности, обусловлено неправильным направлением преобладающих ветров в районе Гватемалы и отсутствием поворота южных ветров. Еще одним следствием неправильного воспроизведения характерных восточной части Тихого океана южных ветров является отсутствие тонких подынверсионных облаков близости северо-западного побережья Южной Америки. В то же время следует отметить, что подынверсионные облака хорошо воспроизводятся вблизи берегов Чили и Перу. Данный тип облаков формируется благодаря апвеллингу, вследствие которого в атмосфере вблизи верхней границы пограничного слоя формируется устойчивый инверсионный слой. Подынверсионные облака препятствуют прогреву поверхности океана и возникновению процессов глубокой конвекции в атмосфере. Эффект от присутствия облаков этого типа можно видеть на рис. 2а, где иллюстрируется поток солнечной радиации на поверхности Земли (в $\text{Вт}/\text{м}^2$), осредненный за 11 лет в период с 30 ноября 1993 г. по 31 ноября 2003 г.

Можно видеть, что в сравнении с реанализом ERA5 (рис. 2б), осредненным за тот же 11-летний период времени, поле коротковолновой радиации достаточно хорошо согласуется. На рис. 1а хорошо прослеживаются обусловленные подынверсионной облачностью характерные минимумы солнечной радиации у западных берегов Африки, Северной и Южной Америки. Однако следует отметить, что эффект от наличия подынверсионных облаков в этих регионах несколько занижен. Также отметим заметное ослабление потока солнечного излучения на поверхности в западной части Тихого океана вблизи Папуа – Новая Гвинея. Систематическая ошибка в этом регионе связана с особенностью работы параметризаций глубокой конвекции и осадков, которая выражается в чрезмерно интенсивной конденсации и, соответственно, испарении на высоте, соответствующей облакам среднего яруса. На рис. 1а и рис. 2а можно видеть, что ложный минимум солнечного излучения вблизи Папуа – Новая Гвинея соответствует максимуму осадков и является следствием завышенного балла облачности нижнего и среднего ярусов в западной части Тихого океана.

Исследование качества воспроизведения осадков, облачно-радиационных связей и отклика атмосферы на аномалии температуры верхнего перемешанного слоя океана является важным и необходимым элементом разработки совместной модели, объединяющей модели атмосферы, океана и морского льда. Существенный прогресс в описании осредненного поля осадков, полей солнечного и теплового потоков

излучения на поверхности Земли открывает возможность для проведения исследований по воспроизведению дальних связей в атмосфере, обусловленных, в том числе, температурными аномалиями поверхности.

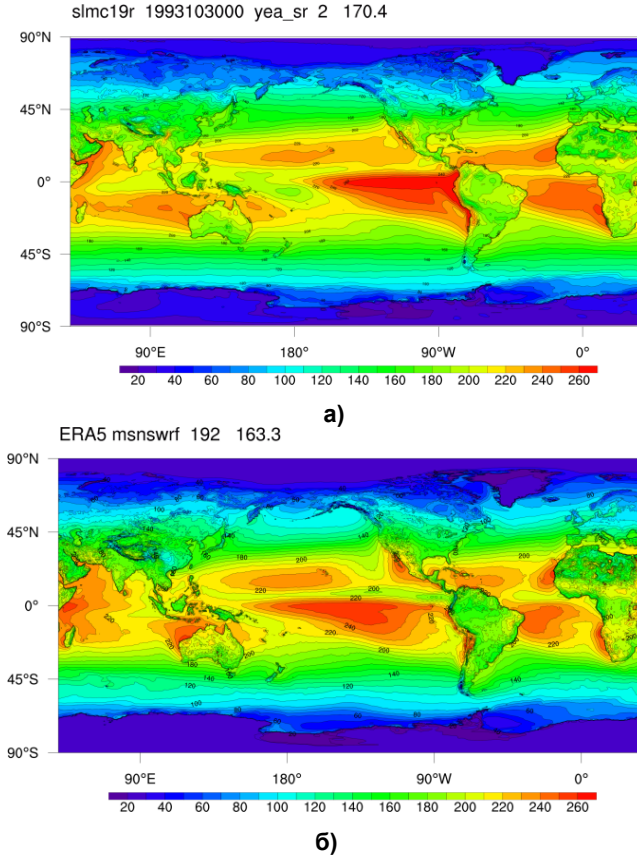


Рис. 2. Осредненный за период с 1993 по 2003 г. поток солнечного излучения на поверхности Земли в модели ПЛАВ (а) и реанализе ERA5 (б). Единицы измерения – Вт/м².

Fig. 2. Solar radiation flux at the surface in SL-AV model (a) and ERA5 reanalysis (б). Units are W/m².

Следует отметить, что в рассматриваемой версии модели ПЛАВ интегральные характеристики потоков тепла на поверхности (солнечно и тепловое излучение, потоки скрытого и явного тепла) в целом близки к рекомендованным МГЭИК (IPCC) значениям. В то же время представленные результаты являются не окончательными, поскольку в качестве начальных данных в почве использовались поля, подготовленные с помощью более ранней версии модели ПЛАВ. Почва в модели атмосферы ПЛАВ сейчас описывается с помощью модели многослойной почвы ИВМ

РАН [2], включающей 11 расчетных уровней, расстояние между которыми зависит от глубины. Большое число уровней и глубокое расположение нижнего уровня позволяет более точно описывать потоки тепла и влаги между атмосферой и почвой. Одновременно с этим существенно усложняется процедура подготовки начальных данных, необходимых для инициализации каждого уровня в почве.

2. Воспроизведение динамики стратосферы

Климат стратосферы в сезонных прогнозах модели ПЛАВ версии 2019 года для зимнего периода в Северном полушарии характеризовался значительным замедлением циркумполярного вихря. Средний за декабрь и январь зонально-осредненный ветер в районе 60° с. ш., 10 гПа, был на 15 м/с слабее, чем по данным наблюдений.

Ранее проводились работы по настройке параметризаций гравитационно-волнового сопротивления (ГВС) в модели. Был внедрен усовершенствованный вариант параметризации орографического ГВС, учитывающий среднеквадратический уклон подсеточной орографии. Главный результат этих работ заключался в уменьшении систематической ошибки среднесезонального ветра в районе 10 гПа на 60° с. ш. зимой с 15 до 5 м/с (при сравнении с данными реанализа ERA-Interim [8]).

Циркуляция атмосферы наиболее чувствительна к настройкам параметризаций гравитационно-волнового сопротивления [14, 19] и явному трению на верхних уровнях модели. При этом в эксперименте типа AMIP параметризации гравитационно-волнового сопротивления в модели ПЛАВ создают меньший тормозящий эффект в тропосфере, чем аналогичные параметризации в модели климата ИВМ РАН [25] и модели GEOS-5 [20]. Тормозящий эффект в стратосфере примерно одинаковый в трех моделях.

По итогам сравнения с моделью ИВМ РАН и GEOS-5 мы решили не производить перенастройку параметризаций гравитационно-волнового сопротивления (с целью уменьшения тормозящего эффекта), а уменьшить явное трение (релеевского типа) на верхних уровнях модели. Уровень включения явного трения был поднят с 1 до 0,2 гПа. Таким образом, в конфигурации модели ПЛАВ для сезонного прогноза с 96 уровнями явное трение работает на четырех верхних уровнях модели. Базовый коэффициент трения был уменьшен в два раза до величины, примерно равной $1/5$ сут. Для предотвращения развития вычислительно неустойчивых мод в стратосфере был повышен коэффициент демпфирования дивергенции до $1/6$ часов на верхнем модельном уровне. Нижняя граница зоны демпфирования дивергенции была снижена до 1 гПа. На этом уровне коэффициент демпфирования обращается в ноль.

Были рассчитаны сезонные прогнозы на четыре месяца (ноябрь, декабрь, январь, февраль) с начальных данных 30 октября каждого года в диапазоне 1991–2005 гг. Применялась модель атмосферы ПЛАВ

с описанными изменениями. Рассчитан климат прогнозов на зимний сезон. На рис. 3 показано зонально осредненное поле зонального ветра для модели ПЛАВ версий 2019 и 2020 гг., а также его различия по сравнению с данными реанализа ERA-Interim [8]. После внесения изменений в среднем за сезон циркумполярный вихрь в модели ПЛАВ на уровне 10 гПа и ниже оказался приблизительно до 2–3 м/с слабее, чем в реанализе. Такой уровень различия примерно равен неопределенности реанализа на этих уровнях. При этом на уровне 1 гПа ветер до 7,5 м/с сильнее, чем по данным реанализа, однако на этом уровне и неопределенность реанализа выше. Таким образом, средняя ошибка климата сезонных прогнозов была значительно уменьшена. Далее планируется изучить воспроизведение моделью ПЛАВ072L96 генерации крупномасштабных волн Россби в тропосфере и их распространение в стратосфере.

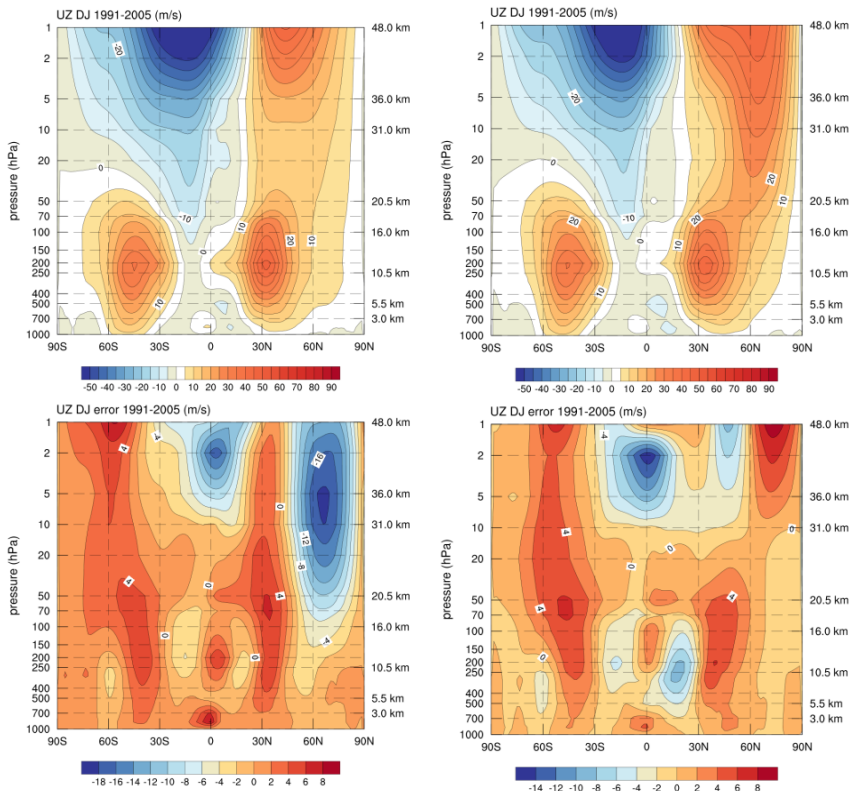


Рис. 3. Поле зонально-осредненного зонального ветра в декабре-январе по данным субсезонных прогнозов модели ПЛАВ за 1991-2005 гг. Верхний ряд – поле ветра по данным старой (слева) и новой (справа) версий модели ПЛАВ. Нижний ряд – отклонение от данных реанализа ERA-Interim [8].

Fig. 3. Zonal mean zonal wind field in December-January averaged over 1991-2005 SL-AV forecasts. Top row: old model version (left), new version (right). Bottom row: the same as top row but for deviation of these fields from ERA-Interim reanalysis data.

3. Другие усовершенствования

В настоящее время в модель атмосферы ПЛАВ072L96 внедрен более совершенный учет влияния морского льда. В дополнение к введенному ранее расчету температуры поверхности льда на основе уравнения баланса тепла на поверхности учитывается, что лед имеет большую длину шероховатости по сравнению с водой. Также морской лед в модели ПЛАВ имеет свои характерные излучательную способность и альбедо. Внедрено усовершенствованное описание термической длины шероховатости над заснеженной поверхностью, следуя [18]. Это, в частности, привело к снижению ошибок прогноза температуры на уровне 2 м и поверхности 850 гПа в среднесрочных прогнозах.

«Память» влагосодержания почвы является одним из источников предсказуемости на субсезонном масштабе. Ранее к модели атмосферы ПЛАВ уже была подключена модель многослойной почвы ИВМ РАН – НИВЦ МГУ [2] с использованием интегрального подхода, однако имелся ряд недостатков, приводивших к некорректному воспроизведению температуры, влагосодержания и содержания льда в почве. В 2020 г. модель многослойной почвы была подключена заново, при этом были внедрены несколько модификаций в расчетах пограничного слоя атмосферы (в части формулировки нижнего граничного условия). Подготовлен и проверен блок усвоения почвенных характеристик для модели многослойной почвы, что позволит корректно инициализировать почву при расчете долгосрочных прогнозов.

Ранее генерация ансамбля начальных данных по атмосфере для расчета долгосрочных прогнозов производилась с помощью устаревшего метода бридинга [1]. При этом размер ансамбля мог быть не более 20 участников. В 2020 г. запущена в опытную эксплуатацию ансамблевая система среднесрочных прогнозов, которая среди прочего генерирует ансамбль начальных данных размером в 60 участников. Ее предварительное описание представлено в [21].

Заключение

К настоящему моменту большинство ведущих метеорологических центров ВМО для целей долгосрочного прогноза аномалий погоды применяют совместные модели, объединяющие в себе модели атмосферы, океана и морского льда. В России такая модель разрабатывается совместными усилиями Гидрометцентра России и ИВМ РАН. Одним из компонентов такой модели является глобальная модель атмосферы ПЛАВ. Успешность долгосрочного прогноза по совместной модели зависит от многих факторов и технологий. Однако повышение качества прогноза за счет перехода с глобальной прогностической модели атмосферы на совместную модель может быть достигнуто только в том случае, когда в атмосфере формируется физически правильный отклик на аномалии

характеристик поверхности. В данной работе приводятся результаты исследований, направленных на совершенствование климатических характеристик модели. Показано, что актуальная версия модели ПЛАВ072L96 для долгосрочного прогноза погоды заметно лучше воспроизводит процесс глубокой конвекции и связанные с ней осадки. Также в этой версии заметно снижена ошибка воспроизведения циркумполярного вихря в «зимней» стратосфере Северного полушария. Эти результаты, а также ряд других выполненных работ по развитию модели, позволяют перейти в ближайшее время к испытаниям системы долгосрочного прогноза на основе модели ПЛАВ 072L96.

Список литературы

1. Вильфанд Р.М., Зарипов Р.Б., Киктев Д.Б., Круглова Е.Н., Крыжов В.Н., Куликова И.А., Тищенко В.А., Толстых М.А., Хан В.М. Долгосрочные метеорологические прогнозы в Гидрометцентре России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 12-36.
2. Володин Е.М., Лысков 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. 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.
4. Толстых М.А. Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Гойман Г.С., Хан В.М. Воспроизведение зимней циркуляции атмосферы в Северной Евразии моделью ПЛАВ 972L96 // Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде CITES '2019 27 мая – 6 июня 2019, Москва, Россия. Избр. Труды. С. 42-44.
5. 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.
6. Шашкин В.В., Толстых М.А., Володин Е.М. Моделирование циркуляции стратосферы полулагранжевой моделью атмосферы ПЛАВ // Метеорология и гидрология. 2019. № 1. С. 5-21.
7. Bougeault P. A simple parameterization of the large-scale effects of cumulus convection // Mon. Wea. Rev. 1985. Vol. 113. P. 2108-2121.
8. Dee D., Uppala S., Simmons A., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M. A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hersbach H., Hólm E., Isaksen L., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A., Monge-Sanz B., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 2011. Vol. 137. P. 553-597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
9. Domeisen D.I., Butler A.H., Charlton-Perez A.J., Ayarzagüena B., Baldwin M.P., Dunn-Sigouin E., Kim H. The role of the stratosphere in subseasonal to seasonal

prediction: 2. Predictability arising from stratosphere-troposphere coupling // *J. Geophys. Res.: Atmospheres*. 2020. Vol. 125 (2). E2019JD030923.

10. *Franzke C., Lee S., Feldstein S.B.* Is the North Atlantic Oscillation a Breaking Wave? // *J. Atmos. Sci.* 2004. Vol. 61. C. 145-160.

11. *Gerard L., Geleyn J.-F.* Evolution of a subgrid deep convection parametrization in a limited-area model with increasing resolution // *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 2005. Vol. 131. P. 2293-2312.

12. *Henderson S.A., Maloney E.D.* The Impact of the Madden-Julian Oscillation on High-Latitude Winter Blocking during El Niño-Southern Oscillation Events // *J. Climate*. 2018. Vol. 31. P. 5293-5318.

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., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N.* The ERA5 global reanalysis // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 2020. Vol. 146. P. 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

14. *Hines C.O.* Doppler spread parameterization of gravity wave momentum deposition in the middle atmosphere. Part 1, Basic formulation // *J. Atm. Terr. Phys.* 1997. Vol. 59. № 4. P. 371-386.

15. *Jenney A.M., Nardi K.M., Barnes E.A., Randall D.A.* The seasonality and regionality of MJO impacts on North American temperature // *Geophysical Research Letters* 2019. Vol. 46, no.159. P. 9193-9202.

16. *Lee R.W., Woolnough S.J., Charlton-Perez A.J., Vitart F.* ENSO Modulation of MJO Teleconnections to the North Atlantic and Europe // *Geophys. Res. Lett.* 2019. Vol. 46, no. 22. P. 13535-13545.

17. *Lin H.* Subseasonal Forecast Skill over the Northern Polar Region in Boreal Winter // *J. Climate*. 2020. Vol. 33. P. 1935-1951. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0408.1>.

18. *Mašek J.* Improved treatment of surface roughness in the ISBA scheme, 2018. LACE Reports.

https://www.rclace.eu/File/Physics/2018/masek_isba_roughness_Oct2018.pdf

19. *Mlynarz T.* Paramétrisation du frottement des ondes de gravité orographiques Hypothèse de résonance // Rapport de stage, Météo France, Centre de Recherches en Météorologie Dynamique (CRMD), Juin-Aout Maitrise de Physique et Applications, Université P. Et M. Curie, Paris. 1990. P. 26.

20. *Molod A., Takacs L., Suarez M., Bacmeister J.* Development of the GEOS-5 atmospheric general circulation model: evolution from MERRA to MERRA2 // *Geosci. Model Dev.* 2015. Vol. 8. P. 1339-1356.

21. *Mizyak V., Rogutov V., Alipova K.* Development of the new ensemble weather prediction system at the Hydrometcentre of Russia // *J. Phys. Conf.* 2020, 6 p. Accepted

22. *Seo K.-H., Lee H.-J.* Mechanisms for a PNA-like teleconnection pattern in response to the MJO // *J. Atmos. Sci.* 2017. Vol. 74, no. 6. P. 1767-1781.

23. *Tseng K.-C., Barnes E.A., Maloney E.D.* Prediction of the midlatitude response to strong Madden-Julian oscillation events on S2S time scales // *Geoph. Res. Lett.* 2018. Vol. 45. P. 463-470.

24. Tseng K., Maloney E., Barnes E. The Consistency of MJO Teleconnection Patterns: An Explanation Using Linear Rossby Wave Theory // *J. Climate*. 2019. Vol. 32. P. 531-548.

25. Volodin E., Mortikov E., Kostykin S., Galin V., Lykosov V., Gritsun A., Dian-sky N., Gusev A., Iakovlev N. Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5 // *Climate Dynamics*. 2017. Vol. 49. P. 3715-3734.

26. Woollings T., Hoskins B., Blackburn M., Berrisford P. A New Rossby Wave-Breaking Interpretation of the North Atlantic Oscillation // *J. Atmos. Sci.* 2008. Vol. 65. P. 609-626.

References

1. Vilfand R.M., Zaripov R.B., Kiktev D.B., Kruglova E.N., Kryjov V.N., Kulikova I.A., Tischenko V.A., Tolstykh M.A., Khan V.M. Long-range forecasting at Hydrometeorological Center of Russia. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [*Hydrometeorological Research and Forecasting*], 2019, vol. 374, no. 4, pp. 12-36. [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. Opisanie 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* [*Izv., Atmos. Oceanic Phys.*], 1998, vol. 34, no. 4, pp. 453-465. [in Russ.].

3. 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.].

4. Tolstykh M.A., Fadeev R.Yu., Shashkin V.V., Goyman G.S., Khan V.M. Simulation of North Eurasia winter atmosphere circulation with the SLAV 972L96 model. International Young Scientists School and Conference on Computational Information Technologies for Environmental Sciences CITES '2019, 27 May – 6 June 2019, Moscow, Russia. *Izbrannye Trudy*, Moscow, pp. 42-44. [in Russ.].

5. 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.

6. 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.

7. Bougeault P. A simple parameterization of the large-scale effects of cumulus convection. *Mon. Wea. Rev.*, 1985, vol. 113, pp. 2108-2121.

8. Dee D., Uppala S., Simmons A., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M. A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hersbach H., Hólm E., Isaksen L., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A., Monge-Sanz B., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2011, vol. 137, pp. 553-597. DOI: 10.1002/qj.828.

9. Domeisen D.I., Butler A.H., Charlton-Perez A.J., Ayarzagüena B., Baldwin M.P., Dunn-Sigouin E., Kim H. The role of the stratosphere in subseasonal to seasonal

prediction: 2. Predictability arising from stratosphere-troposphere coupling. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, 2020, vol. 125 (2), E2019JD030923.

10. Franzke C., Lee S., Feldstein S.B. Is the North Atlantic Oscillation a Breaking Wave? *J. Atmos. Sci.*, 2004, vol. 61, pp. 145-160.

11. Gerard L., Geleyn J.-F. Evolution of a subgrid deep convection parametrization in a limited-area model with increasing resolution. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 2005, vol. 131, pp. 2293-2312.

12. Henderson S.A., Maloney E.D. The Impact of the Madden-Julian Oscillation on High-Latitude Winter Blocking during El Niño-Southern Oscillation Events. *J. Climate*, 2018, vol. 31, pp. 5293-5318.

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., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N. The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 2020, vol. 146, pp. 1999-2049. DOI: 10.1002/qj.3803.

14. Hines C.O. Doppler spread parameterization of gravity wave momentum deposition in the middle atmosphere. Part 1, Basic formulation. *J. Atm. Terr. Phys.*, 1997, vol. 59, no. 4, pp. 371-386.

15. Jenney A.M., Nardi K.M., Barnes E.A., Randall D.A. The seasonality and regionality of MJO impacts on North American temperature. *Geophysical Research Letters*, 2019, vol. 46, no. 159, pp. 9193-9202.

16. Lee R.W., Woolnough S.J., Charlton-Perez A.J., Vitart F. ENSO Modulation of MJO Teleconnections to the North Atlantic and Europe. *Geophys. Res. Lett.*, 2019, vol. 46, no. 22, pp. 13535-13545.

17. Lin H. Subseasonal Forecast Skill over the Northern Polar Region in Boreal Winter. *J. Climate*, 2020, vol. 33, pp. 1935-1951. DOI: 10.1175/JCLI-D-19-0408.1.

18. Mašek J. Improved treatment of surface roughness in the ISBA scheme, 2018. LACE Reports. Available at: https://www.rclace.eu/File/Physics/2018/masek_isba_roughness_Oct2018.pdf

19. Mlynarz T. Paramétrisation du frottement des ondes de gravité orographiques Hypothèse de résonance. Rapport de stage, Météo France, Centre de Recherches en Météorologie Dynamique (CRMD), Juin-Aout Maitrise de Physique et Applications, Université P. Et M. Curie, Paris. 1990, p. 26.

20. Molod A., Takacs L., Suarez M., Bacmeister J. Development of the GEOS-5 atmospheric general circulation model: evolution from MERRA to MERRA2. *Geosci. Model Dev.*, 2015, vol. 8, pp. 1339-1356.

21. Mzyak V., Rogutov V., Alipova K. Development of the new ensemble weather prediction system at the Hydrometcentre of Russia. *J. Phys. Conf.*, 2020, 6 p.

22. Seo K.-H., Lee H.-J. Mechanisms for a PNA-like teleconnection pattern in response to the MJO. *J. Atmos. Sci.*, 2017, vol. 74, no. 6, pp. 1767-1781.

23. Tseng K.-C., Barnes E.A., Maloney E.D. Prediction of the midlatitude response to strong Madden-Julian oscillation events on S2S time scales. *Geoph. Res. Lett.*, 2018, vol. 45, pp. 463-470.

24. Tseng K., Maloney E., Barnes E. The Consistency of MJO Teleconnection Patterns: An Explanation Using Linear Rossby Wave Theory. *J. Climate*, 2019, vol. 32, pp. 531-548.

25. Volodin E., Mortikov E., Kostykin S., Galin V., Lykossov V., Gritsun A., Dian-sky N., Gusev A., Iakovlev N. Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5. *Climate Dynamics*, 2017, vol. 49, pp. 3715-3734.

26. Woollings T., Hoskins B., Blackburn M., Berrisford P. A New Rossby Wave-Breaking Interpretation of the North Atlantic Oscillation. *J. Atmos. Sci.*, 2008, vol. 65, pp. 609-626.

*Поступила 19.01.2021; одобрена после рецензирования 02.03.2021;
принята в печать 23.03.2021.*

*Submitted 19.01.2021; approved after reviewing 02.03.2021;
accepted for publication 23.03.2021.*