

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-1-6-23>

УДК 551.509.339

## Применение стохастических возмущений параметров в версии модели ПЛАВ для долгосрочных прогнозов

*К.А. Алипова<sup>1,2</sup>, М.А. Толстых<sup>2,1</sup>,  
Р.Ю. Фадеев<sup>2,1</sup>*

<sup>1</sup>*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва, Россия;*

<sup>2</sup>*Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука  
Российской академии наук, г. Москва, Россия  
ksusha\_ast@mail.ru*

В статье изучается влияние применения возмущений параметров схем описания процессов подсеточного масштаба модели атмосферы ПЛАВ на характеристики среднемесячной атмосферной циркуляции при расчете ансамблевых субсезонных прогнозов. Выполнены расчеты ретроспективных прогнозов за 25 лет для различных сезонов с различными наборами возмущений, результаты сравнивались с прогнозами без применения возмущений. Показано, что возмущение трех параметров уменьшает ошибки прогноза некоторых величин по сравнению с невозмущенными прогнозами, не внося при этом погрешности в интегральные характеристики.

*Ключевые слова:* долгосрочный прогноз погоды, стохастическое возмущение параметров параметризаций, глобальная модель атмосферы ПЛАВ

## Application of stochastic parameter perturbations in SL-AV model version for long-range forecasting

*K.A. Alipova<sup>1,2</sup>, M.A. Tolstykh<sup>2,1</sup>, R.Yu. Fadeev<sup>2,1</sup>*

<sup>1</sup>*Hydrometeorological Research Center  
of Russian Federation, Moscow, Russia;*

<sup>2</sup>*Marchuk Institute of Numerical Mathematics  
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
ksusha\_ast@mail.ru*

The paper examines the impact of applying the disturbances of parameters for the schemes describing subgrid-scale processes in the SL-AV atmosphere model on the characteristics of average monthly atmospheric circulation in ensemble subseasonal forecasts. 25-year retrospective forecasts are computed for different seasons with different perturbation sets, the results are compared with forecasts without perturbations. It is shown that perturbing three parameters reduces forecast errors of some variables as compared to undisturbed forecasts without introducing errors into integral characteristics.

*Keywords:* long-range weather forecasting, stochastic perturbation of parametrization parameters, SL-AV global atmospheric model

## Введение

Атмосфера является неустойчивой физической средой. В численном прогнозе погоды любые малые возмущения начальных данных могут приводить к существенному расхождению траекторий в фазовом пространстве уже через 5–7 дней расчета. Ансамблевый прогноз погоды позволяет оценивать степень неопределенности прогнозов и предсказывать вероятность того или иного метеорологического явления. В настоящее время ансамблевые прогнозы погоды широко применяются во всем мире.

В кратко- и среднесрочном (заблаговременностью, согласно определению ВМО, до 14 суток) прогнозе традиционно применяются ансамбли возмущенных начальных данных, позволяющие учитывать их неопределенность в сочетании с различными методами учета неопределенности прогностической модели. В сезонном прогнозе экспериментально установлено, что даже небольшое возмущение начальных данных приводит к достаточному (для представления ошибки модели) разбросу ансамбля уже через месяц интегрирования модели. Под разбросом ансамбля здесь понимается среднеквадратическое отклонение прогнозов в ансамбле от среднего по ансамблю прогноза для соответствующей прогностической переменной модели. Для корректного представления неопределенности прогноза необходимо, чтобы разброс ансамбля соответствовал среднеквадратической ошибке среднего по ансамблю прогноза [7].

Далее будут использованы следующие определения. Под параметризацией того или иного физического (чаще всего неадиабатического) процесса подсеточного масштаба понимается алгоритм параметризованного описания этого процесса в модели. Тенденцией прогностической переменной вследствие параметризаций назовем сумму правых частей уравнения динамики атмосферы для этой переменной, умноженную на величину шага по времени.

В последние годы наблюдается бурное развитие субсезонного прогноза (заблаговременностью от 2 до 6 недель) [17]. Возмущения начальных данных может быть недостаточно для достижения на первых неделях прогноза разброса ансамбля, примерно равного ошибке (неопределенности) одиночного прогноза. В то же время возмущение параметров и тенденций параметризаций модели может менять среднее воспроизводимое состояние атмосферы, а следовательно, снижать успешность субсезонного прогноза.

Данной проблеме посвящено несколько работ. Ранее в статье [23] было отмечено положительное влияние применения стохастических возмущений тенденций параметризаций в совместной модели (то есть в модели океана – атмосферы) сезонного прогноза Европейского центра среднесрочных прогнозов на воспроизведение ряда важных явлений, например, колебания Маддена – Джулиана. В работе [25] система среднесрочного ансамблевого прогноза была опробована на субсезонном прогнозе. Отмечено позитивное влияние усовершенствований в стохастических возмущениях

тенденций параметризаций. С другой стороны, в недавней работе [11] показано, что применение стохастических возмущений с нулевым средним значением в параметризациях вызывает асимметричный отклик в средних характеристиках атмосферной циркуляции (благодаря пороговому эффекту в ряде описаний неадиабатических процессов в моделях), в частности, изменяется распределение осадков. Под пороговым эффектом в данном случае понимается быстрое качественное изменение в физическом процессе. В качестве примера можно привести течение жидкости при разных числах Рейнольдса, когда при превышении порогового значения числа Рейнольдса тип течения меняется с ламинарного на турбулентный.

Ранее в работе [3] было показано, что успешность прогноза зимнего индекса североатлантического колебания долгосрочной версией модели ПЛАВ072L96 выше при использовании набора возмущений только из трех параметров, по сравнению с применением набора возмущений из 26 параметров.

В модели ПЛАВ072L96 применяется простая модель эволюции температуры поверхности океана: к климатическому временному ходу в начальный момент времени добавляются текущие аномалии температуры поверхности океана, которые постепенно затухают. Таким образом, в данной модели отсутствует обратная связь между океаном и атмосферой, поэтому при небольшом нарушении баланса потоков тепла на поверхности океана влияние этого дисбаланса на модельный прогноз на месяц ограничено. В настоящее время разрабатывается совместная модели атмосферы, океана и морского льда на основе модели ПЛАВ [12], и важно убедиться, что стохастические возмущения не влияют на интегральные характеристики этих потоков.

Поэтому представляется актуальным дальнейшее исследование влияния стохастических возмущений в блоке описания неадиабатических процессов модели ПЛАВ в версии для долгосрочных прогнозов на некоторые характеристики модельной циркуляции атмосферы в прогнозах на месяц.

## 1. Модель ПЛАВ

Модель ПЛАВ [2] разработана в Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН и Гидрометцентре России. Она состоит из динамического ядра [22] и набора параметризаций процессов подсеточного масштаба, в заметной части основанного на алгоритмах европейского консорциума ALADIN/LACE [21], а также параметризаций коротко- и длинноволновой радиации CLIRAD SW [9] и RRTMG LW [18]. В модель ПЛАВ включена модель многослойной почвы ИВМ РАН – НИВЦ МГУ [1]. Кроме того, некоторые параметризации разработаны авторами модели ПЛАВ: описание подынверсионной облачности над океанами, учет характеристик поверхности морского льда. Ряд параметризаций (глубокая конвекция, процессы на поверхности и др.) были доработаны авторами модели, эти усовершенствования описаны в [4].

Модель ПЛАВ применяется в Гидрометцентре России для оперативных среднесрочных и долгосрочных прогнозов. Разрешение версии модели ПЛАВ072L96, применяемой для долгосрочных прогнозов, составляет  $0,9 \times 0,72$  градуса (примерно 75 км) по долготе и широте соответственно и 96 вертикальных уровней.

Стохастическое возмущение тенденций и параметров параметризаций процессов подсеточного масштаба было ранее реализовано в версии модели ПЛАВ для среднесрочных ансамблевых прогнозов [6].

Для возмущения тенденций и параметров параметризаций формируется двумерное случайное поле, скоррелированное по времени и по пространству. Подробное описание генератора случайных возмущений представлено в работе [6]. Настраиваемыми параметрами являются амплитуда возмущений, время декорреляции и масштаб автокорреляции по пространству. Также в модели ПЛАВ можно установить требуемый тип распределения для каждой случайной величины (нормальное или логарифмически нормальное распределение) и задать значение математического ожидания. Всего в среднесрочных ансамблевых прогнозах возмущаются 26 параметров и тенденции завихренности (то есть ротора тенденции зональной и меридиональной компонент скорости ветра) и температуры вследствие параметризаций. 26 возмущаемых параметров участвуют в параметрическом описании таких процессов, как глубокая и мелкая конвекция, процессы в планетарном пограничном слое, торможение гравитационных волн при взаимодействии с рельефом, фазовые переходы водяного пара, в том числе образование осадков и облачности, тепло- и влагообмен с подстилающей поверхностью с учетом типа растительности и наличия снега и пр. Описание этих параметров также приведено в [6].

В данной работе для долгосрочных прогнозов применяется набор возмущений из 26 параметров, применяемых в среднесрочной прогностической технологии, но без возмущений тенденций (далее обозначен E26), а также набор возмущений E3 из трех параметров, описанный ниже. Все параметры набора E3 входят и в набор E26. В этом наборе возмущаются следующие параметры:

- GCVADS – коэффициент в формуле для вычисления верхней границы конвекции;
- HOBST – эффективная высота препятствия в единицах давления при вычислении волнового сопротивления при обтекании рельефа;
- RAD1 – параметр, используемый при вычислениях эффективных радиусов отдельно для водяных капель и ледяных кристаллов в облаке.

Перечисленные возмущаемые параметры входят в параметризацию, соответственно, глубокой конвекции, взаимодействия рельефа с крупномасштабным потоком, длинно- и коротковолновой радиации.

Выбор набора возмущаемых параметров для долгосрочных прогнозов основан на характерных временных масштабах процессов, в которые

вносятся возмущения. Параметр  $\text{NOBST}$  применяется для описания гравитационно-волнового сопротивления при обтекании рельефа, он влияет на крупномасштабную динамику атмосферы через обрушение и торможение зонального потока в верхней тропосфере. Неопределенности, возникающие при параметрическом описании гравитационно-волнового сопротивления, исследуются в работе [10]. Эффективные радиусы капель и кристаллов в облаке используются в параметризациях длинно- и коротковолновой радиации, которая относится к «медленным» процессам. В то же время параметр  $\text{GCVADS}$  используется в параметризации конвекции, которая считается «быстрым» процессом. Данный параметр был выбран для возмущения эмпирически.

Амплитуда возмущений параметров из набора E26 соответствует амплитуде возмущений этих параметров в среднесрочной прогностической технологии и учитывает опыт зарубежных коллег [20] несмотря на то, что в модели ПЛАВ применяются другие параметризации и возмущается другой набор параметров. Амплитуда возмущений параметров из набора E3 была уменьшена по сравнению с амплитудой в наборе E26, поскольку в субсезонном прогнозе не требуется настолько большой разброс ансамбля. Настройка амплитуды возмущений производилась по результатам численных экспериментов.

## 2. Численные эксперименты и результаты

Для всех экспериментов используется один и тот же программный код модели и начальные условия, полученные на сетке модели ПЛАВ, с использованием данных реанализа ERA5 [14] (для ретроспективных прогнозов за 1991–2015 гг.) или объективного анализа Гидрометцентра России [5] (для отдельных долгосрочных прогнозов на месяц).

### 2.1. Ретроспективные прогнозы за 1991–2015 гг.

Сначала было исследовано влияние стохастических возмущений на воспроизведение среднемесячной и среднесезонной циркуляции атмосферы в ретроспективных прогнозах. Для этого выполнен расчет ансамблевых прогнозов на 4 месяца со стартовых дат 30 апреля и 30 октября с 1991 по 2015 год с наборами возмущений E26 и E3. Размер каждого ансамбля – 10, используются четыре набора начальных данных со сдвигом на 6 часов в пределах одного дня, а также активируется один из наборов стохастических возмущений параметров блока описания неадиабатических процессов в модели, описанных в предыдущем разделе. Для получения ансамбля размером 10 два раза используются начальные данные за 00 и 06 часов ВСВ, три раза – начальные данные за 12 и 18 часов стартового дня. Размер ансамбля возмущенных начальных данных 10 применяется в оперативной технологии долгосрочных ансамблевых прогнозов, хотя технология подготовки начальных данных там несколько иная (см. [3]). Напомним, что

возмущения тенденций параметризаций отключены в обоих случаях. Отдельно были рассчитаны прогнозы с отключенными возмущениями параметров, размер прогностического ансамбля в этом случае составляет 4.

Для полей температуры на поверхности 850 гПа, приземной температуры, давления на уровне моря, геопотенциала поверхности 500 гПа и осадков рассчитывались средние и среднеквадратические ошибки, коэффициент корреляции аномалий для среднего по ансамблю прогноза, а также вероятностные оценки – площадь под кривой относительной операционной характеристики (ROC) прогноза вероятности градаций «выше нормы» и «ниже нормы» для соответствующих терцилей распределения. Оценивались прогностические поля за первый месяц прогнозов и за второй–четвертый месяц, затем оценки всех ретроспективных прогнозов за 1991 по 2015 год с соответствующей стартовой даты осреднялись. Отдельно рассматривались оценки по глобусу, по тропикам ( $20^\circ$  ю. ш. –  $20^\circ$  с. ш.) и внетропическим частям Северного и Южного полушарий.

Для всех указанных показателей оказалось, что их значения для наборов возмущений E26 и E3 отличаются незначительно, как для первого месяца прогнозов, так и для среднего за 2–4 месяца прогноза. Например, для прогноза на месяц геопотенциала высоты 500 гПа в Южном полушарии (старт с 30 апреля) для набора E26 среднеквадратическая ошибка составляет 44,2 м, а для E3 – 45 м. Для других регионов разница в несколько раз меньше. Для температуры на уровне 2 м разница между среднеквадратическими ошибками в двух экспериментах не превышает 0,01 градуса во всех оцениваемых регионах. Аналогичные результаты отмечены и для средней ошибки. Для критериев ROC градаций «выше нормы» и «ниже нормы» для всех верифицируемых переменных во всех регионах различие не превышает 0,02. Максимальное различие отмечено для давления на уровне моря, а для большинства оцениваемых переменных и регионов разница составляет всего 0,001–0,002.

В отличие от разницы ошибок между экспериментами с различными наборами возмущений, разница ошибок между возмущенными и невозмущенными прогнозами для некоторых переменных и регионов более заметна. Значимое уменьшение средних и среднеквадратических ошибок получено для температуры на уровне 2 м во внетропической части Южного полушария. Так, для прогнозов на месяц со стартом 30 апреля разница между возмущенным и невозмущенным прогнозом в средней ошибке температуры на уровне 2 м во внетропической части Южного полушария составила 0,14 К, а в среднеквадратической ошибке – 0,27 К. Также в возмущенных прогнозах по сравнению с невозмущенными наблюдается небольшое уменьшение ошибок для отдельных переменных в отдельных регионах, а для остальных переменных значимых изменений в ошибках нет.

Данные результаты говорят о том, что внесение стохастических возмущений немного уменьшает интегральные ошибки долгосрочных прогнозов модели ПЛАВ. Достаточным является возмущение лишь трех

параметров. Однако для региональных атмосферных явлений результаты могут быть другие.

## 2.2. Оценка влияния стохастических возмущений на отдельный долгосрочный прогноз

Для исследования влияния стохастических возмущений на отдельный долгосрочный прогноз было выполнено три численных эксперимента по два ансамблевых прогноза в каждом, в которых применялся различный набор возмущаемых параметров. Также отличалась и амплитуда возмущений. Обозначения и их расшифровка для каждого эксперимента приведены в табл. 1. Рассчитаны ансамбли прогнозов на 30 суток с начальными данными 00 часов ВСВ 30 мая 2020 г. и 00 часов 25 августа 2021 года.

**Таблица 1.** Обозначения экспериментов  
**Table 1.** Experiments notations

Обозначение	Расшифровка
<b>ref</b>	Контрольный эксперимент без стохастического возмущения параметров и тенденций
<b>stoch_med</b>	Соответствует набору возмущений E26, тенденции температуры и завихренности не возмущаются. Амплитуда возмущений соответствует версии модели ПЛАВ для среднесрочных ансамблевых прогнозов
<b>stoch_long</b>	Соответствует набору возмущений E3, тенденции температуры и завихренности не возмущаются. Амплитуда возмущений для всех параметров уменьшена по сравнению с E26

В экспериментах **stoch\_med** и **stoch\_long** вычислялись ансамбли размером в 10 и 36 прогнозов. Эксперимент **ref** представляет собой один детерминистический прогноз на 30 суток. Таким образом, во всех экспериментах использовались одни и те же начальные данные.

Сначала была выполнена оценка интегральных средних за месяц величин приземной температуры (T2m), потока уходящей длинноволновой радиации на верхней границе атмосферы (OLR), потока приходящей на землю коротковолновой радиации на поверхности Земли (FSW). Двумерные поля этих элементов усреднялись по глобусу, по ансамблю (кроме эксперимента **ref**) и по времени (кроме осадков, которые усреднялись по пространству и ансамблю и суммировались по времени). Эти величины сравнивались между собой, а также с соответствующими полями из реанализа ERA5. Поток уходящей длинноволновой радиации на верхней границе атмосферы сравнивался со спутниковыми наблюдениями [15].

Разница в указанных интегральных величинах между средними значениями по ансамблю из 10 и 36 прогнозов оказалась незначимой и далее не рассматривается. Далее в работе будут рассматриваться оценки для ансамблей из 36 прогнозов.

Рассмотрим вычисленные средние по глобусу среднемесячные значения приземной температуры (Т2м), потока уходящей длинноволновой радиации на верхней границе атмосферы для эксперимента со стартом с данных за 25 августа 2021 г. (результаты для начальных данных 30 мая 2020 г. аналогичны и потому не приводятся). Эти данные приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Значения интегральных среднемесячных характеристик для расчета с 25 августа 2021 г. Обозначения приведены в тексте  
**Table 2.** Monthly averaged integral characteristics for the experiment started from August 25, 2021. Notations are in the text

	Т2м (град К)	OLR (Вт/м <sup>2</sup> )	FSW (Вт/м <sup>2</sup> )
<b>Спутниковые данные измерений</b>	-	240,63	-
<b>ERA5</b>	289,18	-	163,12
<b>Ref</b>	287,69	243,41	166,49
<b>Stoch_med</b>	287,75	242,43	163,26
<b>Stoch_long</b>	287,78	242,01	163,22

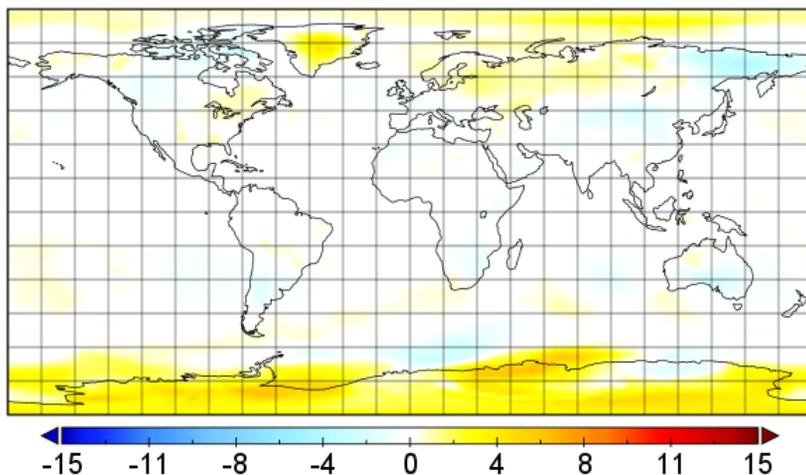
Отметим, что в расчетах использовалась экстраполяция по времени аномалий температуры поверхности океана (описана во введении), в отличие от реанализа, где эти данные соответствуют наблюдениям. Над океаном температура на уровне 2 м близка к температуре поверхности океана.

С учетом этого, из табл. 2 можно заключить, что значимых различий в интегральных значениях рассматриваемых величин между экспериментами **stoch\_long** (с набором возмущений из трех параметров E3) и **stoch\_med** (с набором возмущений из 26 параметров E26) не наблюдается. При этом значения OLR и FSW в одиночном расчете со стохастическими возмущениями чуть ближе, соответственно, к значениям данных наблюдений и реанализа, чем в контрольном эксперименте **ref**.

Рассмотрим теперь воспроизведение полей рассматриваемых величин на региональном уровне для эксперимента по начальным данным от 25 августа 2021 г. Далее будут рассмотрены разности среднемесячных глобальных полей температуры на уровне 2 м, потоков приходящей на Землю коротковолновой радиации на поверхности Земли, потоков уходящей длинноволновой радиации на верхней границе атмосферы, а также разности суммарных осадков за 30 суток для экспериментов **stoch\_med** и **stoch\_long** по сравнению с контрольным экспериментом **ref**.

### *Приземная температура*

На рис. 1 приведены разности полей средней по ансамблю приземной температуры для экспериментов **stoch\_long** и **ref**.



**Рис. 1.** Разность средней по ансамблю среднемесячной температуры на уровне 2 м за период с 25 августа по 23 сентября 2021 г. между экспериментами **stoch\_long** и **ref**. Среднее значение по глобусу составило 0,06 К, минимум -3,9 К, максимум 6,3 К.

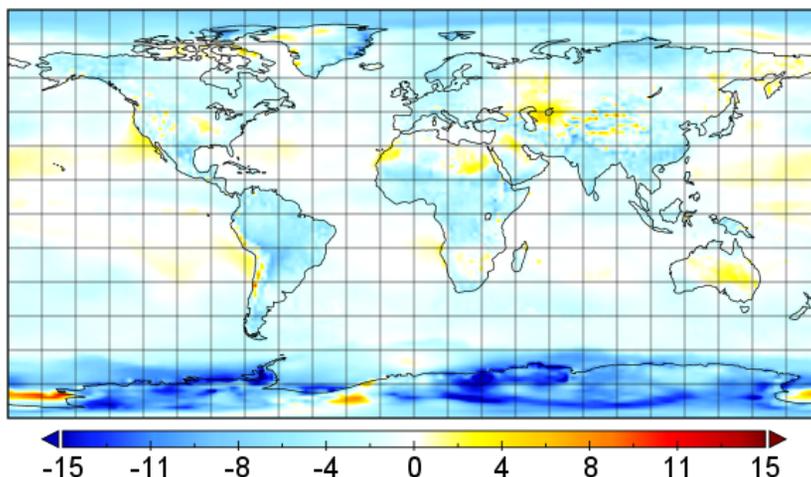
**Fig. 1.** The difference in the ensemble mean monthly averaged 2 m temperature for the period from August 25 to September 23, 2021 in **stoch\_long** experiment with respect to **ref** experiment. The global mean is 0.06 K, the minimum is -3.9 K, the maximum is 6.3 K.

Из рис. 1 видно, что среднемесячная температура на уровне 2 м за 25 августа – 23 сентября 2021 г. в эксперименте **stoch\_long** по сравнению с контрольным экспериментом **ref** существенно завышена, примерно на 6 градусов, в Антарктиде. Аналогичная разница по сравнению с контрольным экспериментом получена в эксперименте **stoch\_med** (не показано).

На рис. 2 показана разность между среднемесячной температурой на уровне 2 м в эксперименте **ref** и реанализом ERA5. Из рис. 2 видно, что в невозмущенном прогнозе модели ПЛАВ происходит существенное занижение приземной температуры воздуха на величину до 18 градусов в Антарктиде.

Рис. 1 и 2 показывают, что эксперимент **stoch\_long** (а также эксперимент **stoch\_med**, который не приводится) лучше воспроизводит приземную температуру воздуха, чем контрольный эксперимент без стохастического возмущения параметров, что наиболее заметно проявляется во внетропической части Южного полушария. Этот результат согласуется с результатами, полученными в работах других авторов [23, 25], а также с оценками ретроспективных прогнозов за 1991–2015 гг., приведенными в разделе 2.1, где было показано уменьшение средней и среднеквадратической ошибки приземной температуры воздуха во внетропической части Южного полушария при применении в модели стохастического возмущения обоих наборов параметров E3 и E26.

Возможная причина такого эффекта в том, что в модели ПЛАВ применяется упрощенная параметризация температуры поверхности льда на суше, основанная на схеме ISBA [19], изначально ориентированной на кратко- и среднесрочный прогноз. Это приводит к значительной чувствительности температуры поверхности льда к изменениям приземных характеристик в атмосфере.

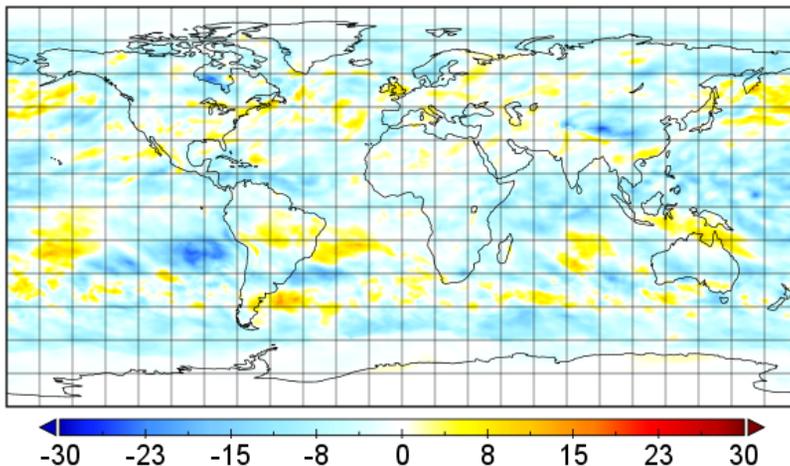


**Рис. 2.** Разность среднемесячной температуры на уровне 2 м за период с 25 августа по 23 сентября 2021 г. между экспериментом **ref** и реанализом ERA5. Среднее значение по глобусу составило -1,5 К, минимум -18,6 К, максимум 11,1 К.

**Fig. 2.** The difference in monthly averaged 2 m temperature for the period from August 25 to September 23, 2021 in **ref** experiment with respect to ERA5 reanalysis. The global mean is -1.5 K, the minimum is -18.6 K, the maximum is 11.1 K.

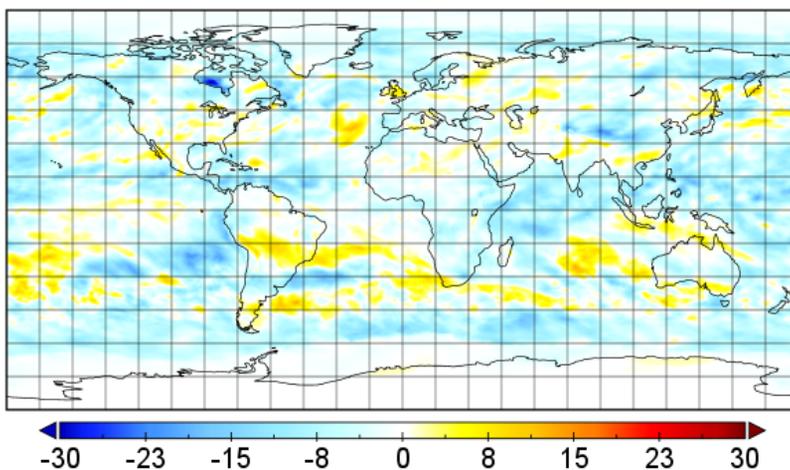
### *Поток приходящей на Землю коротковолновой радиации на поверхности Земли*

На рис. 3 и 4 показаны разности потоков приходящей на поверхность Земли солнечной радиации для экспериментов **stoch\_long** и **stoch\_med** по сравнению с контрольным экспериментом **ref**. Видно, что отклонения от контрольного эксперимента в экспериментах **stoch\_med** и **stoch\_long** сопоставимы и их максимумы достигают примерно 25–30 Вт/м<sup>2</sup> в обоих случаях. Изменение среднего по глобусу количества приходящей солнечной радиации в обоих случаях составляет примерно -3 Вт/м<sup>2</sup>. Это изменение говорит о том, что даже незначительные возмущения небольшого количества параметров в модели влекут за собой значительное разбегание траекторий за 30 суток.



**Рис. 3.** Разность среднемесячных потоков приходящей на поверхность Земли солнечной радиации ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) за период с 25 августа по 23 сентября 2021 г. между экспериментами **stoch\_long** и **ref**. Среднее значение разности по глобусу составило  $-3,3 \text{ Вт}/\text{м}^2$ , минимум  $-25,5 \text{ Вт}/\text{м}^2$ , максимум  $14,8 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

**Fig. 3.** The difference in monthly averaged solar radiation fluxes at the Earth's surface ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) for the period from August 25 to September 23, 2021 in **stoch\_long** experiment with respect to **ref** experiment. The global mean is  $-3.3 \text{ W}/\text{m}^2$ , the minimum is  $-25.5 \text{ W}/\text{m}^2$ , the maximum is  $14.8 \text{ W}/\text{m}^2$ .

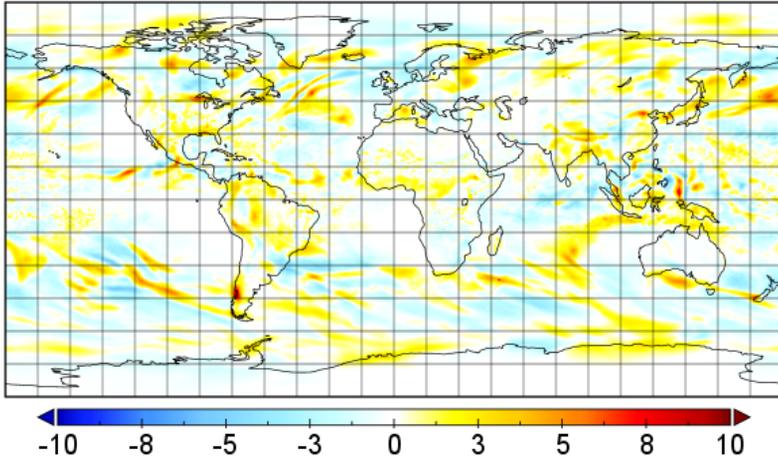


**Рис. 4.** Разность среднемесячных потоков приходящей на поверхность Земли солнечной радиации ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) за период с 25 августа по 23 сентября 2021 г. между экспериментами **stoch\_med** и **ref**. Среднее значение по глобусу составило  $-3,2 \text{ Вт}/\text{м}^2$ , минимум  $-30 \text{ Вт}/\text{м}^2$ , максимум  $13,3 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

**Fig. 4.** The difference in monthly averaged solar radiation fluxes at the Earth's surface ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) for the period from August 25 to September 23, 2021 in **stoch\_med** experiment with respect to **ref** experiment. The global mean is  $-3.2 \text{ W}/\text{m}^2$ , the minimum is  $-30 \text{ W}/\text{m}^2$ , the maximum is  $13.3 \text{ W}/\text{m}^2$ .

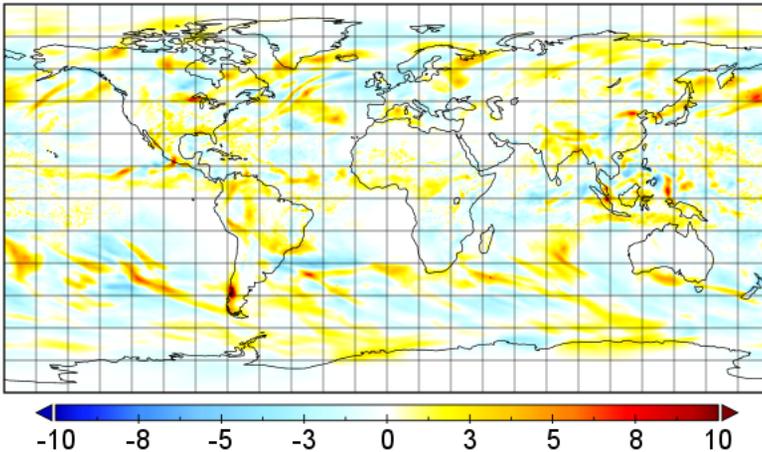
### Осадки

Рассмотрим аккумулярованные поля осадков за период с 25 августа по 23 сентября 2021 года.



**Рис. 5.** Разность осадков, аккумулярованных за период с 25 августа по 23 сентября 2021 г. между экспериментами **stoch\_long** и **ref** (в мм). Среднее значение по глобусу составило -0,05, минимум -6,9, максимум 9,9.

**Fig. 5.** The difference in monthly accumulated precipitation for the period from August 25 to September 23, 2021 in **stoch\_long** experiment with respect to **ref** experiment (in mm). The global mean is -0.05, the minimum is -6.9, the maximum is 9.9.



**Рис. 6.** Разность осадков, аккумулярованных за период с 25 августа по 23 сентября 2021 г. между экспериментами **stoch\_med** и **ref** (в мм). Среднее значение по глобусу составило -0,04, минимум -7,1, максимум 11,7.

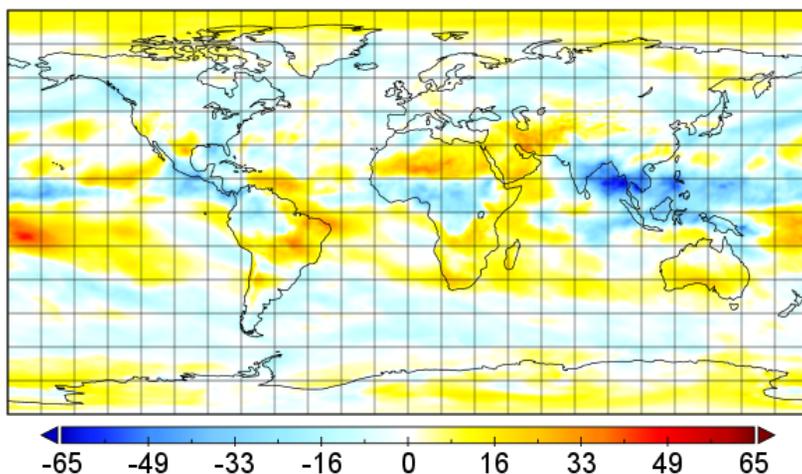
**Fig. 6.** The difference in monthly accumulated precipitation for the period from August 25 to September 23, 2021 in **stoch\_med** experiment with respect to **ref** experiment (in mm). The global mean is -0.04, the minimum is -7.1, the maximum is 11.7.

На рис. 5 и 6 видно, что среднее значение разности аккумулярованных за месяц осадков относительно контрольного эксперимента почти одинаково для экспериментов **stoch\_long** и **stoch\_med** и близко к нулю. Это говорит о пространственном перераспределении осадков при сохранении их количества.

*Поток уходящей длинноволновой радиации на верхней границе атмосферы*

Одним из источников предсказуемости в тропической атмосфере на субсезонном временном масштабе является колебание Маддена – Джулиана [16]. Данное колебание распространяется из конвективно активных тропических регионов на восток через Индийский и Тихий океаны, характерные временные масштабы этого процесса составляют 30–60 суток. В ряде работ показана связь колебания Маддена – Джулиана с явлением Эль-Ниньо [24] и с предсказуемостью атмосферных явлений в средних широтах [8, 13].

Успешность прогноза колебания Маддена – Джулиана во многом зависит от правильной настройки параметризации конвекции в модели, и в том числе от способности модели предсказывать поток восходящей тепловой радиации на верхней границе модельной атмосферы. Рассмотрим среднемесячный поток уходящей тепловой радиации на верхней границе атмосферы в проведенных экспериментах и сравним его со спутниковыми данными измерений [15] (рис. 7).



**Рис. 7.** Разность среднемесячных потоков тепловой радиации на верхней границе атмосферы за период с 25 августа по 23 сентября 2021 г. между спутниковыми данными и экспериментом **stoch\_long**, Вт/м<sup>2</sup>.

**Fig. 7.** The difference in monthly averaged outgoing longwave radiation fluxes at the top of the atmosphere for the period from August 25 to September 23, 2021 in **stoch\_long** experiment with respect to satellite data, W/m<sup>2</sup>.

На рис. 7 видна область завышения потока тепловой радиации на верхней границе атмосферы примерно на  $60 \text{ Вт/м}^2$  в эксперименте **stoch\_long** относительно данных измерений. Похожие результаты были получены при сравнении экспериментов **stoch\_med** и **ref** со спутниковыми данными измерений. Во всех трех экспериментах наблюдается сопоставимое завышение потока тепловой радиации на верхней границе атмосферы в одной и той же области земного шара.

Отличие трех экспериментов состоит в разности интегральных среднемесячных потоков, которые приведены в табл. 3. Для получения этих данных для каждого эксперимента сначала была рассмотрена разность среднемесячного потока тепловой радиации на верхней границе атмосферы относительно спутниковых данных измерений, а затем вычислено интегральное значение этой разности по глобусу. Из табл. 3 видно, что наименьшее отклонение интегрального потока тепловой радиации на верхней границе атмосферы достигается в эксперименте **stoch\_long**, а наибольшее – в контрольном эксперименте. Это говорит о возможности применения ограниченного набора стохастически возмущаемых параметров в субсезонном прогнозе.

**Таблица 3.** Значения разности интегральных среднемесячных потоков восходящей тепловой радиации на верхней границе атмосферы для экспериментов **ref**, **stoch\_med** и **stoch\_long** относительно спутниковых данных для периода с 25 августа по 23 сентября 2021 года

**Table 3.** The differences in monthly averaged integral outgoing longwave radiation fluxes at the top of the atmosphere for **ref**, **stoch\_med** and **stoch\_long** experiments with respect to satellite data for the period from August 25 to September 23, 2021

	<b>ref</b>	<b>stoch_med</b>	<b>stoch_long</b>
Разность потока восходящей тепловой радиации на верхней границе атмосферы по сравнению со спутниковыми данными измерений ( $\text{Вт/м}^2$ )	-2,77	-1,78	-1,37

Дополнительно исследованы изменения изучаемых выше среднемесячных полей при возмущении только одного параметра **NOBST**, а также комбинации параметров **NOBST + RAD1** и **NOBST + GCVADS**. Для приземной температуры и осадков значимых отличий от эксперимента **stoch\_long** для всех указанных комбинаций возмущаемых параметров не обнаружено. Для потоков приходящей на Землю коротковолновой радиации на поверхности Земли и уходящей длинноволновой радиации на верхней границе атмосферы полученные различия составляют примерно  $0,04 \text{ Вт/м}^2$ , что является незначимой величиной. Отсюда можно сделать вывод о возможности в перспективе возмущения в модели одного параметра **NOBST** вместо набора параметров **E3**.

## Заключение

Для субсезонных прогнозов модели атмосферы ПЛАВ исследовано влияние применения стохастически возмущаемых параметров в блоке описания процессов подсеточного масштаба. Оказалось, что применение таких возмущений улучшает воспроизведение некоторых интегральных характеристик модельной атмосферы и уменьшает ошибку, например, прогноза приземной температуры в Антарктиде. Эти результаты согласуются с ранее полученными [25]. На серии ретроспективных прогнозов показано, что по сравнению с ансамблевыми среднесрочными прогнозами, в которых для достижения необходимой величины разброса ансамбля применяется набор из 26 возмущаемых параметров, для субсезонных прогнозов достаточно возмущать лишь три параметра. Именно такая конфигурация применяется в оперативной версии модели ПЛАВ для долгосрочных прогнозов. Показана возможность дальнейшего уменьшения количества возмущаемых параметров до одного после проведения дополнительных расчетов серии ретроспективных прогнозов.

## Список литературы

1. Володин Е.М., Лыкоsov В.Н. Параметризация процессов тепло- и влагообмена в системе растительность – почва для моделирования общей циркуляции атмосферы. 1. Описание и расчеты с использованием локальных данных наблюдений // Известия Российской академии наук. ФАО. 1998. Т. 34, № 4. С. 453-465.
2. Толстых М.А., Шашкин В.В., Фадеев Р.Ю., Шляева А.В., Мизяк В.Г., Рогутов 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.
3. Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Травова С.В., Зарипов Р.Б., Гойман Г.С., Алипова К.А., Мизяк В.Г., Тищенко В.А., Круглова Е.Н. Модель долгосрочного прогноза погоды ПЛАВ072L96 // Метеорология и гидрология. 2024. Принято в печать.
4. Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Толстых М.А., Травова С.В., Мизяк В.Г., Рогутов В.С., Алипова К.А. Развитие системы долгосрочного прогноза Гидрометцентра России в 2020 году // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 1 (379). Р. 58-72. <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-1-58-72>.
5. Цырульников М.Д., Свиренко П.И., Гайфулин Д.Р., Горбунов М.Е., Успенский А.Б. Развитие системы оперативного усвоения данных метеорологических наблюдений в Гидрометцентре России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 112-126. <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2019-4-112-126>.
6. Alipova K.A., Goyman G.S., Tolstykh M.A., Mizyak V.G., Rogutov V.S. Stochastic perturbation of tendencies and parameters of parameterizations in the global ensemble prediction system based on the SL-AV model // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2022. No. 37(6). P. 331-347. <https://doi.org/10.1515/rnam-2022-0027>.
7. Barker T.W. The relationship between spread and forecast error in extended-range forecasts // J. Climate. 1991. Vol. 4, no. 7. P. 733-742. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1991\)004<0733:TRBSAF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1991)004<0733:TRBSAF>2.0.CO;2).

8. Cassou C. Intraseasonal interaction between the Madden–Julian oscillation and the North Atlantic oscillation // *Nature*. 2008. Vol. 455. P. 523-527. <https://doi.org/10.1038/nature07286>.

9. Chou M.-D., Suarez M.J. A solar radiation parameterization (CLIRAD-SW) for atmospheric studies // NASA Tech. Memo. 1999. Vol. 15. 48 p.

10. Elvidge A.D., Sandu I., Wedi N., Vosper S.B., Zadra A., Boussetta S., Bouyssel F., van Niekerk A., Tolstykh M., Ujiie M. Uncertainty in the Representation of Orography in Weather and Climate Models and Implications for Parameterized Drag // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2019. Vol. 11. P. 2567-2585. <https://doi.org/10.1029/2019MS001661>.

11. Deinhard M., Grams C.M. Towards a process-oriented understanding of the impact of stochastic perturbations on the model climate // *EGUsphere* [preprint]. 2023. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-1938>.

12. Fadeev R.Yu. The Parallel Performance of SLNE Atmosphere-Ocean-Sea Ice Coupled Model // *Supercomputing Frontiers and Innovations*. 2023. Vol. 10, no. 3. P. 13-22. <https://doi.org/10.14529/jsfi230305>.

13. Frederiksen J.S., Lin H. Tropical-extratropical interactions of intraseasonal oscillations // *J. Atmos. Sci.* 2013. Vol. 70. P. 3180-3197. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-12-0302.1>.

14. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2020. Vol. 146. P. 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.

15. Lee H.-T. NOAA CDR Program. NOAA Climate Data Record (CDR) of Daily Outgoing Longwave Radiation (OLR), Version 1.2 // NOAA National Climatic Data Center. 2011. <https://doi.org/10.7289/V5SJ1HH2>.

16. Madden R.A., Julian P.R. Observations of the 40–50 day tropical oscillation: a review // *Mon. Weather Rev.* 1994. Vol. 122. P. 814-837. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<0814:OOTDTP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<0814:OOTDTP>2.0.CO;2).

17. Mariotti A., Bagget C., Barnes E.A., Becker E. et al. Windows of opportunity for skillful forecasts Subseasonal to Seasonal and beyond // *Bull. Amer. Met. Soc.* 2020. Vol. 101, no. 5. P. E608-E625. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0326.1>.

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, no. 16. P. 663-682. <https://doi.org/10.1029/97JD00237>.

19. Noilhan J., Mahfouf J.-F. The ISBA land surface parameterization scheme // *Global and Plan. Change*. 1996. Vol. 13. P. 145-159. [https://doi.org/10.1016/0921-8181\(95\)00043-7](https://doi.org/10.1016/0921-8181(95)00043-7).

20. Ollinaho P., Lock S.-J., Leutbecher M., Bechtold P., Beljaars A., Bozzo A. et al. Towards process-level representation of model uncertainties: stochastically perturbed parametrizations in the ECMWF ensemble // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2017. Vol. 143, no. 702. P. 408-422. DOI: 10.1002/qj.2931.

21. Termonia P. et al. The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1 // *Geosci. Model Dev.* 2018. Vol. 11. P. 257-281. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-257-2018>.

22. 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. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-1961-2017>.

23. Weisheimer A., Corti S., Palmer T., Vitart F. Addressing model error through atmospheric stochastic physical parametrizations: impact on the coupled ECMWF seasonal forecasting system // *Phil. Trans. R. Soc. A*. 2014. Vol. 372. P. 20130290.

24. Zhang C. Madden–Julian oscillation // *Rev. Geophys.* 2005. Vol. 43. P. RG2003. <https://doi.org/10.1029/2004RG000158>.

25. Zhu Y., Zhou X., Li W., Hou D., Melhauser C., Sinsky E. et al. Toward the improvement of subseasonal prediction in the National Centers for Environmental Prediction Global Ensemble Forecast System // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2018. Vol. 123. P. 6732–6745. <https://doi.org/10.1029/2018JD028506>.

## References

1. Volodin E.M., Lykosov V.N. Parametrizatsiya processov teplo- i vlagoobmena v sisteme rastitel'nost' – pochva dlya modelirovaniya obshchey cirkulyatsii atmosfery. 1. Opisaniye i raschety s ispol'zovaniem lokal'nykh dannykh nablyudeniyy. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana [Izv., Atmos. Oceanic Phys]*, 1998, vol. 34, no. 4, pp. 453–465 [in Russ.].

2. Tolstykh M.A., Shashkin V.V., Fadeev R.YU., Shlyayeva A.V., Mizyak V.G., Rogutov V.S., Bogoslovskiy N.N., Goyman G.S., Mahnorylova S.V., Yurova A.Yu. Sistema modelirovaniya atmosfery dlya besshovnogo prognoza. Moscow, Triada LTD publ., 2017. 166 p. [in Russ.].

3. Tolstykh M.A., Fadeev R.YU., Shashkin V.V., Travova S.V., Zaripov R.B., Goyman G.S., Alipova K.A., Mizyak V.G., Tishchenko V.A., Kruglova E.N. Model' dolgosrochnogo prognoza pogody PLAV072L96. *Meteorologiya i Gidrologiya [Russ. Meteorol. Hydrol.]*, 2024 [in Russ.], [In Print].

4. Fadeev R. Yu., Shashkin V.V., Tolstykh M.A., Travova S.V., Mizyak V.G., Rogutov V.S., Alipova K.A. Development of the long-range forecast system at Hydrometcentre of Russia in 2020. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2021, vol. 379, no. 1, pp. 58–72 [in Russ.].

5. Цырульников М.Д., Свиренко П.И., Гайфулин Д.Р., Горбунов М.Е., Успенский А.Б. Развитие системы оперативного усвоения данных метеорологических наблюдений в Гидрометцентре России. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, vol. 374, no. 4, pp. 112–126. <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2019-4-112-126>. [in Russ.].

5. Alipova K.A., Goyman G.S., Tolstykh M.A., Mizyak V.G., Rogutov V.S. Stochastic perturbation of tendencies and parameters of parameterizations in the global ensemble prediction system based on the SL-AV model. *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling*, 2022, no. 37(6), pp. 331–347.

7. Barker T.W. The relationship between spread and forecast error in extended-range forecasts. *J. Climate*, 1991, vol. 4, no. 7, pp. 733–742. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1991\)004<0733:TRBSAF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1991)004<0733:TRBSAF>2.0.CO;2).

8. Cassou C. Intraseasonal interaction between the Madden–Julian oscillation and the North Atlantic oscillation. *Nature*, 2008, vol. 455, pp. 523–527. <https://doi.org/10.1038/nature07286>.

9. Chou M.-D., Suarez M.J. A solar radiation parameterization (CLIRAD-SW) for atmospheric studies. *NASA Tech. Memo*, 1999, vol. 15, 48 p.

10. Elvidge A.D., Sandu I., Wedi N., Vosper S.B., Zadra A., Boussetta S., Bouyssel F., van Niekerk A., Tolstykh M., Ujiie M. Uncertainty in the Representation of Orography in Weather and Climate Models and Implications for Parameterized Drag. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2019, vol. 11, pp. 2567–2585. <https://doi.org/10.1029/2019MS001661>.

11. Deinhard M., Grams C.M. Towards a process-oriented understanding of the impact of stochastic perturbations on the model climate. *EGUsphere* [preprint]. 2023. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-1938>.
12. Fadeev R.Yu. The Parallel Performance of SLNE Atmosphere-Ocean-Sea Ice Coupled Model. *Supercomputing Frontiers and Innovations*, 2023, vol. 10, no. 3, pp. 13-22. <https://doi.org/10.14529/jsfi230305>.
13. Frederiksen J.S., Lin H. Tropical–extratropical interactions of intraseasonal oscillations. *J. Atmos. Sci.*, 2013, vol. 70, pp. 3180-3197. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-12-0302.1>.
14. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2020, vol. 146, pp. 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
15. Lee H.-T. NOAA CDR Program. NOAA Climate Data Record (CDR) of Daily Outgoing Longwave Radiation (OLR), Version 1.2. *NOAA National Climatic Data Center*, 2011. <https://doi.org/10.7289/V5SJ1HH2>.
16. Madden R.A., Julian P.R. Observations of the 40–50 day tropical oscillation: a review. *Mon. Weather Rev.*, 1994, vol. 122, pp. 814-837. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<0814:OOTDTP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<0814:OOTDTP>2.0.CO;2).
17. Mariotti A., Bagget C., Barnes E.A., Becker E. et al. Windows of opportunity for skillful forecasts Subseasonal to Seasonal and beyond. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 2020, vol. 101, no. 5, pp. E608-E625. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0326.1>.
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, no. 16, pp. 663-682. <https://doi.org/10.1029/97JD00237>.
19. Noilhan J., Mahfouf J.-F. The ISBA land surface parameterization scheme. *Global and Plan. Change*, 1996, vol. 13, pp. 145-159. [https://doi.org/10.1016/0921-8181\(95\)00043-7](https://doi.org/10.1016/0921-8181(95)00043-7).
20. Ollinaho P., Lock S.-J., Leutbecher M., Bechtold P., Beljaars A., Bozzo A. et al. Towards process-level representation of model uncertainties: stochastically perturbed parametrizations in the ECMWF ensemble. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2017, vol. 143, no. 702, pp. 408-422. DOI: 10.1002/qj.2931.
21. Termonia P. et al. The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1. *Geosci. Model Dev.*, 2018, vol. 11, pp. 257-281. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-257-2018>.
22. 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.
23. Weisheimer A., Corti S., Palmer T., Vitart F. Addressing model error through atmospheric stochastic physical parametrizations: impact on the coupled ECMWF seasonal forecasting system. *Phil. Trans. R. Soc. A.*, 2014, vol. 372, pp. 20130290.
24. Zhang C. Madden–Julian oscillation. *Rev. Geophys.*, 2005, vol. 43, pp. RG2003. <https://doi.org/10.1029/2004RG000158>.
25. Zhu Y., Zhou X., Li W., Hou D., Melhauser C., Sinsky E. et al. Toward the improvement of subseasonal prediction in the National Centers for Environmental Prediction Global Ensemble Forecast System. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, vol. 123, pp. 6732-6745. <https://doi.org/10.1029/2018JD028506>.

Поступила 14.02.2024; одобрена после рецензирования 15.03.2024;  
принята в печать 10.04.2024.

Submitted 14.02.2024; approved after reviewing 15.03.2024;  
accepted for publication 10.04.2024.