

УДК 551.509

Технология сезонного прогнозирования на базе версии модели INM-CM6, включающей дополнительный модуль расчета сверхдолгосрочных прогнозов

**Хан В.М.^{1,2}, Тищенко В.А.¹, Круглова Е.Н.¹,
Реснянский Ю.Д.¹, Субботин А.В.¹, Грицун А.С.²,
Володин Е.М.^{2,1}, Тарасевич М.А.^{2,1}, Брагина В.В.^{2,1}**

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

²Институт вычислительной математики имени Г.И. Марчука РАН, г. Москва, Россия

В рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (ВИП ГЗ) в ФГБУ «Гидрометцентр России» совместно с ФГБУН «ИВМ РАН» в 2023 году разработана система глобального ансамблевого сезонного прогноза на основе климатической модели INM-CM5 [2, 3, 6]. Данная система сезонного прогнозирования успешно прошла испытания и была рекомендована ЦМКП Росгидромета к внедрению в прогностическую практику ФГБУ «Гидрометцентр России» и Северо-Евразийского климатического центра в ноябре 2023 года [5]. Одновременно проводились работы по усовершенствованию модели Земной системы и созданию новой версии INM-CM6 с увеличенным пространственным разрешением, улучшенным описанием физических процессов на подстилающей поверхности, усовершенствованиями в описании облачности и параметризации конденсации и улучшенной вычислительной эффективностью блока океана.

Модель в версиях INM-CM5 и INM-CM6 состоит из основных блоков: блока динамики атмосферы, аэрозольного блока, блока динамики океана и динамики и термодинамики морского льда. В версии INM-CM5 разрешение модели в атмосферном блоке составляет $2^\circ \times 1.5^\circ$ по долготе и широте, 73 сигма-уровней до высоты около 60 км, а в океанском блоке – $0.5^\circ \times 0.25^\circ$ по долготе и широте и 40 сигма-уровней по вертикали. В версии INM-CM6 разрешение модели в атмосферном блоке составляет $1.25^\circ \times 1^\circ$ по долготе и широте, 73 вертикальных сигма-уровней и такие же, как в INM-CM5, параметры сеточной области океанского и ледового блоков.

В версии INM-CM5 начальные состояния атмосферы, океана и суши для сезонных прогнозов задаются в виде аномалий: "климатология модели + аномалия реанализа или текущего анализа на момент старта прогноза". Для построения начальных состояний используются данные реанализа ERA5 для атмосферы и деятельного слоя суши, а также анализы SODA3.4.2

и СУОД ГМЦ для океана и морского льда [1, 4]. Прогностический ансамбль включает 20 реализаций.

В версии INM-CM6 начальные состояния задаются в терминах абсолютных значений с использованием таких же источников атмосферных и океанских данных, как в предыдущей версии INM-CM5: в блоке динамики атмосферы (температура и влажность воздуха, горизонтальные компоненты скорости ветра), в блоке динамики океана и динамики и термодинамики морского льда (температура и солёность океана, сплоченность и толщина морского льда, уровень моря). Для остальных полей способ инициализации по сравнению с INM-CM5 не изменился. Прогностические ансамбли включают 10 реализаций для ретроспективных прогнозов (1991–2020 гг.) и 30 реализаций для квазиоперативных прогнозов (2022–2024 гг.).

Расчеты с INM-CM5 и INM-CM6 производились на вычислительном комплексе Cray XC40.

Согласно Плану испытаний **ЦМКП** проводились оперативные испытания технологии на основе новой версии модели INM-CM6 для периода с 2022 года по март 2024 года, а также оценивались прогнозы на ретроспективной выборке за период с 1991 по 2020 год. В качестве объекта прогнозирования рассматривались среднемесячные и среднесезонные аномалии для нескольких метеорологических параметров, включая давление на уровне моря (MSLP), высоту геопотенциала на уровне 500 гПа (H500), температуру на уровне 850 гПа (T850) и у земной поверхности (T2m), а также осадки (Prec).

В процессе испытаний проводилось сопоставление оценок по двум версиям прогностической модели.

Оценки ретроспективных прогнозов по версии модели INM-CM6.

Анализ оценок качества рассматриваемых метеорологических параметров для месячных детерминистских прогнозов с нулевой, месячной и трёхмесячной заблаговременностью и для сезонных детерминистских прогнозов с нулевой и месячной заблаговременностью с использованием критериев ACC, RMSE, MSSS по пяти различным регионам (земной шар, внетропическая зона Южного полушария, тропическая зона, внетропическая зона Северного полушария, Северная Евразия) показал следующее.

Месячные и сезонные прогнозы с нулевой заблаговременностью обладают наивысшим качеством среди прогнозов большей заблаговременности. Диапазон изменчивости составляет для T2m по MSSS от 0.06 (Северная Евразия) до 0.41 (тропики), для RMSE от 1.9 (Северная Евразия) до 0.39 (тропики) для месячных прогнозов нулевой заблаговременности. Для сезонных прогнозов нулевой заблаговременности диапазон изменчивости составляет для T2m по MSSS от 0.08 (Южные экстратропики) до 0.50 (тропики), для RMSE от 1.29 (Северная Евразия) до 0.34 (тропики). Результаты месячных прогнозов с 2 и 3-месячной заблаговременностью оказываются хуже, особенно в северных регионах.

Анализ оценок качества вероятностных прогнозов проводился для всех параметров для месячных прогнозов с нулевой, месячной и трёхмесячной заблаговременностью и для сезонных прогнозов с нулевой и месячной заблаговременностью на основе показателей ROC_B (Below Normal), ROC_N (Near Normal) и ROC_A (Above Normal) по пяти различным регионам (земной шар, внутропическая зона Южного полушария, тропическая зона, внутропическая зона Северного полушария, Северная Евразия).

В качестве примера ниже представлены выводы для приземной температуры (T2m) по земному шару:

– месячные прогнозы с нулевой заблаговременностью (1 мес.) имеют наивысшие ROC оценки для всех градаций (ниже нормы, около нормы и выше нормы);

– сезонные прогнозы с нулевой заблаговременностью (1–3 мес.) также демонстрируют высокие ROC оценки, ненамного уступая месячным прогнозам: 1–3-месячный прогноз имеет ROC_B = 0.75, ROC_A = 0.74;

– по мере увеличения заблаговременности наблюдается снижение качества прогноза. Для ROC_B и ROC_A от 0.73 (1 мес.) до 0.66 (4 мес.).

Региональные особенности:

– тропическая зона имеет самые высокие ROC значения для всех типов прогнозов и всех градаций, что указывает на высокую надежность прогнозов в этом регионе. Например, для месячного прогноза ROC_B и ROC_A составляют 0.81. Для 1–3-месячных прогнозов ROC_B и ROC_A составляют 0.82. ROC_N имеет меньшие значения по сравнению с крайними градациями. Для месячных прогнозов ROC_N падает от 0.65 до 0.58 по мере увеличения заблаговременности;

– внутропическая зона Северного полушария и Северная Евразия имеют наиболее низкие значения ROC, особенно для прогнозов с большой заблаговременностью;

– для внутропической зоны Южного полушария результаты оценок чуть выше оценок по экстратропикам Северного полушария.

Краткое сравнение оценок качества версий INM-CM6 и INM-CM5. Проводилось сравнение качества исторических прогнозов по двум версиям модели Земной системы (INM-CM5 и INM-CM6). Рассчитывалась оценка статистической значимости изменения оценок ACC, ROC_A, ROC_B. Вычислялась серия разностей показателей, рассчитанных для INM-CM6 и INM-CM5. Затем методом бутстрепа был вычислен 95%-ный доверительный интервал средней разности (10 000 выборок). Если нижняя граница доверительного интервала оказывалась больше нуля, то считалось, что новая модель значимо лучше.

Анализируя разности коэффициентов пространственной корреляции (ACC) для моделей INM-CM6 и INM-CM5 по переменным H500, MSLP, T2m, Prcs можно выделить следующие особенности.

В большинстве месяцев наблюдаются положительные разности, что говорит о том, что INM-CM6 в целом дает более высокие значения ACC по сравнению с INM-CM5 (например, месяц 1, 2, 5, 8, 9, 12). Модель INM-CM6 показывает лучшие результаты по сравнению с INM-CM5 для H500, Prec и T2m, тогда как для MSLP наблюдаются близкие значения оценок для 1 месяца прогнозов и доминирование отрицательных оценок бутстреп анализа для сезонных прогнозов.

Отрицательные значения наблюдаются в июне (-0.026) и ноябре (-0.127), что указывает на худшее качество ретроспективных прогнозов модели INM-CM6 по сравнению с INM-CM5.

В апреле и ноябре все переменные (кроме T2m в 4 месяце) показывают отрицательные разности, что может указывать на слабые стороны INM-CM6 в эти периоды. Особенно это выражено для ноября у MSLP (-0.145) и H500 (-0.127).

Сезонные прогнозы, как правило, имеют меньшие разности оценок, что может указывать на снижение роли отличий в процедуре подготовки начальных данных для разных версий моделей при интегрировании на сезонных интервалах времени.

Для переменных T2m и Prec наблюдается относительная близость в оценках в нескольких месяцах года, с небольшими колебаниями, что может указывать на их меньшую чувствительность к изменениям в настройках разных версий модели.

Для января, февраля, мая и августа характерны наивысшие значения разностей оценок для всех переменных, что может указывать на более успешное прогнозирование климатических паттернов новой версией модели в эти месяцы года.

Результаты показывают, что модель INM-CM6 в целом улучшает прогнозы по сравнению с ее предыдущей версией, однако необходимо учесть особенности для конкретных переменных и периодов прогнозирования.

Оценки квазиоперативных прогнозов. На квазиоперативной выборке для сезонных прогнозов по Северной Евразии с нулевой заблаговременностью по модели INM-CM6 параметр RMSE для T2m варьировался в диапазоне от 0.66 до 1.76, MSSS от -0.67 до 0.70, ACC от -0.23 до 0.6. Средние значения за испытуемый период составили: ACC=0.18; RMSE=1.16; MSSS=0.23. По старой версии модели (INM-CM5) RMSE для T2m варьировался в диапазоне от 0.78 до 1.95, MSSS от -0.52 до 0.55, ACC от -0.3 до 0.47. Средние значения за испытуемый период для старой версии модели составили: ACC=0.13; RMSE=1.25; MSSS=0.12. Уровень статистической значимости разностей оценок по разным версиям модели рассчитывался с использованием критерия Вилкоксона и составил 0.264 (ACC), 0.038 (RMSE), 0.045 (MSSS).

Для осадков по модели INM-CM6 параметр RMSE варьировался в диапазоне от 0.47 до 0.97, MSSS от -1.04 до 0.20, ACC от -0.1 до 0.43. Средние

значения за испытуемый период составили: ACC=0.15; RMSE=0.68; MSSS= -0.21. Для сравнения, по модели INM-CM5 параметр RMSE для осадков варьировался в диапазоне от 0.46 до 1.0, MSSS от -0.54 до 0.06, ACC от -0.15 до 0.29. Средние значения оценок за испытуемый период для старой версии модели составили: ACC=0.07; RMSE=0.68; MSSS= -0.22. Уровень статистической значимости разностей по критерию Вилкоксона составил: 0.01 (ACC), 0.4 (RMSE), 0.33 (MSSS).

Сравнение качества квазиоперативных сезонных прогнозов по версиям INM-CM5 и INM-CM6 с аналогичными прогнозами зарубежных метеоцентров. В ходе испытаний успешность ансамблевых прогнозов моделей INM-CM5 и INM-CM6 сопоставлялась с прогнозами зарубежных метеоцентров, участвующих в проектах WMO LC LRF MME и COPERNICUS. Анализ сезонных прогнозов различных моделей по трем показателям (ACC, RMSE и MSSS) позволяет выделить сильные и слабые стороны каждой модели, а также оценить их эффективность в прогнозировании метеорологических переменных на сезонных интервалах времени.

Модель TCC является лидером среди всех участников по всем трем метрикам (ACC, RMSE и MSSS) для прогнозов T2m на территории Северной Евразии. Модели ECMWF, UKMO и JMA стабильно занимают 2–4 места по всем трем метрикам, что говорит о высоком уровне надежности и точности их прогнозов. Модели INM-CM6, INM-CM5, CMCC и DWD занимают средние позиции, указывая на достаточно хорошее качество прогнозов, хотя и уступают TCC, ECMWF, UKMO и JMA. Модели ECCS, MFR и NCEP занимают нижние позиции по всем показателям.

В период с начала 2022 до начала 2024 года оценки качества прогнозов по модели INM-CM6 для T2m Северной Евразии занимали 4–6 места среди 11 лучших мировых моделей, а для осадков – 5–7 места.

Лучшие результаты достигаются при меньшей заблаговременности прогнозов. Прогнозы с нулевой заблаговременностью для месячных и сезонных прогнозов наиболее успешны.

Несмотря на географические и климатические особенности, прогнозы для тропического региона наиболее успешны для всех типов прогнозов и градаций.

В новой версии модели сохраняется проблема в прогнозировании условий около нормы (ROC_N). Значения ROC для этой градации ниже по сравнению с градациями «ниже нормы» и «выше нормы».

Хотя INM-CM6 в целом показывает обнадеживающие результаты для H500, T850, T2m и Prec, существуют месяцы, требующие более глубокого анализа и понимания причин снижения качества. Обе версии модели показывают различную устойчивость в зависимости от прогнозируемой переменной, что стоит учитывать при применении результатов.

В целом, можно сделать вывод, что модель INM-CM6 демонстрирует лучшее качество прогнозов по сравнению с моделью INM-CM5, хотя

тщательная работа по уменьшению ошибок в прогнозах по-прежнему необходима, особенно в отношении давления на уровне моря и осадков.

Своим решением от 11 сентября 2024 года ЦМКП рекомендовала:

– **внедрить в прогностическую работу** ФГБУ «Гидрометцентр России» технологию сезонного прогнозирования на базе версии модели INM-CM6, включающей дополнительный модуль расчета сверхдолгосрочных прогнозов;

– **внедрить в прогностическую работу** СЕАКЦ технологию сезонного прогнозирования на базе версии модели INM-CM6, включающей дополнительный модуль расчета сверхдолгосрочных прогнозов.

Список литературы

1. Вильфанд Р.М., Зеленько А.А., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С., Цырульников М.Д. Усвоение океанографических данных как одна из ключевых задач оперативной океанологии // *Гидроакустика*. 2023. № 53(1). С. 107-117.

2. Володин Е.М. Воспроизведение современного климата моделью климатической системы INMCM60 // *Известия РАН. ФАО*. 2023. Том 59, № 1. С. 19-26.

3. Володин Е.М., Мортиков Е.В., Кострыкин С.В. и др. Воспроизведение современного климата в новой версии модели климатической системы ИВМ РАН // *Известия РАН. ФАО*. 2017. Том 53, № 2. С. 164-178.

4. Реснянский Ю.Д., Зеленько А.А., Степанов В.Н., Струков Б.С., Хан В.М., Володин Е.М., Грицун А.С., Тарасевич М.А., Брагина В.В. Верификация сезонных прогнозов температуры поверхности океана и ледовых характеристик на основе модели Земной системы ИВМ РАН // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2024. № 4 (394). С. 6-38.

5. Хан В.М., Круглова Е.Н., Тищенко В.А., Куликова И.А., Субботин А.В., Грицун А.С., Володин Е.М., Тарасевич М.А., Брагина В.В. Верификация сезонных ансамблевых прогнозов на базе модели земной системы INM-CM5 // *Метеорология и гидрология*. 2024. № 7. С. 40-56.

6. Bragina V., Volodin E., Chernenkov A. et al. Simulation of climate changes in Northern Eurasia by two versions of the INM RAS Earth system model // *Clim. Dyn.* 2024. Vol. 62. P. 7783-7797.