

*В.М. Хан<sup>1,2</sup>, В.А. Тищенко<sup>1,2</sup>, Е.Н. Круглова<sup>1</sup>, А.В. Субботин<sup>1</sup>, Ю.Д. Реснянский<sup>1</sup>,  
Е.М. Володин<sup>2,1</sup>, А.С. Грицун<sup>2</sup>, В.В. Воробьева<sup>2,1</sup>, М.А. Тарасевич<sup>2,1</sup>*

## **Система сезонного метеорологического прогноза на базе модели INM-CM5**

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

*<sup>2</sup> Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, г. Москва*

### **Введение**

В рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (ВИП ГЗ) в части «разработки глобальной модели Земной системы мирового уровня для исследовательских целей и сценарного прогнозирования климатических изменений, повышения точности климатических моделей и надежности климатических прогнозов» в соответствии с Планом мероприятий по реализации распоряжения Правительства Российской Федерации от 02.09.2022 № 2515-р, в ФГБУ «Гидрометцентр России» совместно с ФГБУН «Институт вычислительной математики имени Г.И. Марчука РАН» разработана система глобального ансамблевого сезонного прогноза на основе глобальной климатической модели INM-CM5.

21

### **Описание технологии**

Технология ансамблевого прогноза построена на базе глобальной климатической модели INM-CM5 [6,7] и системы генерации ансамбля начальных состояний [8].

Модель состоит из блоков динамики атмосферы, аэрозольного блока, блока динамики океана и блока динамики и термодинамики морского льда. Разрешение модели в атмосферном блоке составляет  $2^\circ \times 1.5^\circ$  по долготе и широте с 73  $\sigma$ -уровнями до высоты около 60 км, а в океанском блоке –  $0.5^\circ \times 0.25^\circ$  по долготе и широте с 40  $\sigma$ -уровнями по вертикали. Модель участвует в программе CMIP6 по сравнению климатических моделей и показывает результаты, соответствующие лучшим современным моделям.

Для возможности проведения оперативных расчетов сезонных прогнозов на вычислительном комплексе Cray XC40-LC ФГБУ «ГВЦ Росгидромета», внедрена автоматизированная система построения начального состояния. Интегрирование ансамблевого прогноза происходит автоматически в несколько этапов, включающих создание начальных состояний для климатической модели ИВМ РАН на требуемую дату начала прогноза, запуск ансамбля прогнозов на вычислительном комплексе Cray XC40-LC и подготовку результатов прогноза для дальнейшей обработки и использования в Гидрометцентре России.

Начальные состояния атмосферы, океана и суши для сезонных прогнозов задаются в виде аномалий на момент старта прогноза, накладываемых на модельный климат. Такой подход обусловлен стремлением избежать резких изменений, вызванных большими отклонениями начального поля от состояния модели с приспособленной собственной динамикой.

Для создания начальных состояний на дату начала прогноза используются ежедневные данные реанализа ERA5 [4] для атмосферы и деятельного слоя суши, а также анализа SODA3.4.2 [3] (1991-2020 гг.) и GODAS HMC [2] (с 2021 г.) для океана и морского льда. Ансамбль начальных состояний (20 членов ансамбля) формируется путем внесения в начальное состояние температуры воздуха на всех  $\sigma$ -уровнях модели в каждой точке модельной сетки длинноволнового возмущения с амплитудой 0.1 К.

Расчеты с моделью INM-CM5 проводились на высокопроизводительном вычислительном комплексе (ВБК) Cray XC40-LC. На 1600 ядрах расчет 20 членов ансамбля сезонного прогноза на 6 месяцев выполняется за 7 часов. Результаты записываются в базу данных системы АССОИ Гидрометцентра России.

### **Протокол испытаний**

Согласно Плану испытания новых и усовершенствованных технологий (методов) гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов Росгидромета на 2023 г., утвержденному руководителем Росгидромета, проводились оперативные испытания технологии на основе модели INM-CM5 для периода со II квартала 2021 г. по III квартал 2023 г., а также оценивались прогнозы на ретроспективной выборке за период с 1991 по 2020 г. В качестве объекта прогнозирования рассматривались среднемесячные и среднесезонные аномалии (с нулевой и одномесячной заблаговременностью) для нескольких метеорологических параметров, включая давление на уровне моря (MSLP), высоту геопотенциала 500 гПа (H500), температуру на уровне 850 гПа (T850) и у земной поверхности (T2м), а также осадки (PREC).

При проверке использовались следующие показатели для детерминистских прогнозов:  $ACC$  – коэффициент корреляции аномалий;  $\rho$  – показатель совпадения по знаку;  $RMSE$  – среднеквадратическая ошибка прогноза;  $MSSS$  – общий показатель качества (мера мастерства) для некатегориальных детерминистических прогнозов.

Оценка вероятностных прогнозов осуществлялась с помощью показателя ROC [1, 5]. Отдельно вычислялись показатели для категорий выше ( $ROC\_A$ ), около ( $ROC\_N$ ), ниже ( $ROC\_B$ ) нормы и по всем трем категориям ( $ROC\_AG$ ).

Обобщенная проверка прогнозов проводилась по всем узлам регулярной географической сетки с шагом по широте и долготе  $2,5^\circ$  и осреднением по крупным регионам: территории земного шара, внетропической части Северного полушария ( $20-90^\circ$  с. ш.), внетропической части Южного полушария ( $20-90^\circ$  ю. ш.), тропической зоне ( $20^\circ$  ю. ш. –  $20^\circ$  с. ш.), Северной Евразии ( $35-75^\circ$  с. ш.,  $20^\circ - 180^\circ$  в. д.).

В период испытаний производилось сравнение успешности ансамблевых прогнозов по модели INM-CM5 с успешностью ансамблевых прогнозов зарубежных метеоцентров.

### **Результаты оценки ретроспективных прогнозов**

В табл. 1, 3, 4, 5 и 6 приведены средние оценки ретроспективных прогнозов для H500, T2м, T850, MSLP, PREC по модели ИВМ РАН для всех стартовых дат за период 1991–2020 гг. В табл. 2 отдельно приведены оценки прогноза H500 для территории Северной Евразии.

Представлены оценки для каждого из четырех прогностических месяцев (в таблицах обозначены как мес1, мес2, мес3, мес4), а также для средних сезонных за 1–3, 2–4 прогностические месяцы (мес1–3, мес2–4).

В среднем качество прогнозов по модели ИВМ РАН рассматриваемых пяти параметров (табл. 1–6) по земному шару и по отдельно взятым регионам соответствует мировому уровню. Самая высокая успешность прогнозов по всем параметрам отмечается для тропической зоны. Значения критериев качества в тропиках заметно выше по сравнению с теми же критериями для других регионов. Наиболее низкие оценки качества, как и следовало ожидать, прослеживаются для территории Северной Евразии. Оценки для сезонных прогнозов с нулевой и месячной заблаговременностью заметным образом выше, чем для месячных прогнозов с заблаговременностью от 0 до 4 месяцев.

Из табл. 1 видно, что значения  $ACC$  для ретроспективных сезонных прогнозов с нулевой заблаговременностью превышают пороговое значение 0.36 с 95%-ным уровнем значимости для всех рассматриваемых регионов, кроме Северной Евразии. Но в то же время, если сравнивать успешность сезонных прогнозов H500 по территории Северной Евразии с некоторыми ведущими метеоцентрами, то оценки зарубежных моделей ECMWF, Met Office, NCEP имеют более низкие значения  $ACC$  в Северной Евразии (см. табл. 2).

Средние оценки качества ретроспективных прогнозов **H500** по модели  
Земной системы ИВМ РАН за период 1991–2020 гг.

Месяц	Глобус	Внетроп. часть Южного полушария	Тропики	Внетроп. часть Северного полушария	Северная Евразия
<i>ACC</i>					
мес1	0.45	0.31	0.70	0.32	0.27
мес2	0.39	0.24	0.68	0.26	0.20
мес3	0.38	0.22	0.65	0.25	0.18
мес4	0.35	0.20	0.63	0.22	0.14
мес1-3	0.53	0.40	0.79	0.40	0.34
мес2-4	0.49	0.35	0.77	0.37	0.30
<i><math>\rho</math></i>					
мес1	0.31	0.20	0.50	0.22	0.17
мес2	0.27	0.15	0.49	0.17	0.13
мес3	0.25	0.14	0.46	0.16	0.11
мес4	0.24	0.13	0.44	0.14	0.09
мес1-3	0.37	0.26	0.59	0.27	0.22
мес2-4	0.35	0.22	0.58	0.23	0.19
<i>RMSE (мм)</i>					
мес1	2.64	4.12	0.56	3.18	3.79
мес2	2.64	3.99	0.57	3.28	3.89
мес3	2.70	3.85	0.63	3.54	4.17
мес4	2.81	3.70	0.70	3.95	4.55
мес1-3	1.66	2.47	0.41	2.05	2.35
мес2-4	1.72	2.42	0.46	2.24	2.54
<i>MSSS</i>					
мес1	0.05	0.05	0.42	0.04	0.04
мес2	0.08	0.08	0.45	0.08	0.08
мес3	0.09	0.08	0.42	0.09	0.08
мес4	0.09	0.07	0.39	0.08	0.07
мес1-3	0.16	0.15	0.62	0.13	0.13
мес2-4	0.15	0.13	0.59	0.14	0.13
<i>ROC_A</i>					
мес1	0.72	0.64	0.85	0.65	0.62
мес2	0.70	0.61	0.85	0.63	0.59
мес3	0.68	0.60	0.84	0.62	0.58
мес4	0.68	0.60	0.83	0.60	0.56
мес1-3	0.76	0.69	0.91	0.69	0.66
мес2-4	0.75	0.66	0.90	0.68	0.64
<i>ROC_N</i>					
мес1	0.58	0.53	0.66	0.54	0.52
мес2	0.56	0.52	0.65	0.52	0.52
мес3	0.56	0.52	0.63	0.52	0.52
мес4	0.56	0.52	0.62	0.52	0.52
мес1-3	0.61	0.55	0.73	0.55	0.54
мес2-4	0.60	0.54	0.70	0.54	0.53
<i>ROC_B</i>					
мес1	0.69	0.64	0.79	0.64	0.62
мес2	0.68	0.61	0.81	0.61	0.59
мес3	0.67	0.60	0.79	0.61	0.58
мес4	0.66	0.59	0.79	0.59	0.56
мес1-3	0.73	0.68	0.84	0.68	0.65
мес2-4	0.72	0.65	0.84	0.66	0.63

Значения *MSSS* для всех месячных и сезонных прогнозов положительные, что указывает на превосходство методического прогноза над прогнозом на основе климата. Значения *ROC* превышают 0.6 для крайних градаций и приближаются к 0.5 для градации «около нормы».

При анализе оценок для всех рассматриваемых параметров стоит отметить, что качество прогнозов снижается медленнее с увеличением заблаговременности в сравнении с другими мировыми и региональными центрами, специализирующимися в области долгосрочного метеорологического прогнозирования (ссылка: <https://wmo1c.org/>). Показатели *MSSS* во всех крупных районах, независимо от заблаговременности, имеют положительные значения, за исключением некоторых прогнозов с месячным осреднением. Это свидетельствует о высоком качестве прогнозов. Оценки вероятностных прогнозов по критерию *ROC* превышают 0.5, что указывает на преимущество методических прогнозов перед случайными.

Наиболее сложно прогнозируемым гидрометеорологическим параметром являются осадки. Как и ожидалось, оценки успешности осадков в сравнении с другими параметрами являются наиболее скромными. В табл. 6 представлены оценки с использованием разных критериев качества для осадков по отдельным регионам. Качество прогноза осадков в регионах схоже с качеством прогнозов для остальных параметров: наилучшие показатели отмечены в тропиках и наихудшие в Северной Евразии. Детерминистские прогнозы указывают на слабый прогностический сигнал для осадков. Оценки *ROC* для вероятностных прогнозов показывают, что качество прогнозов немного превышает качество случайных прогнозов. Этот уровень предсказуемости осадков в Северной Евразии характерен практически для всех мировых прогностических моделей.

Таблица 2

Оценки успешности прогнозов **H500** для территории Северной Евразии  
по модели Земной системы ИВМ РАН и некоторым моделям мировых центров  
по долгосрочным прогнозам

	Оценки детерминистских прогнозов по критерию <i>ACC</i>			
	мес1	мес2	мес3	мес1–3
Модель Земной системы ИВМ РАН	0.27	0.20	0.18	0.34
Модель Met Office	0.15	0.17	0.07	0.15
Модель ECMWF	0.23	0.16	0.18	0.30
Модель NCEP	0.12	0.12	0.0	0.15

Средние оценки качества ретроспективных прогнозов **MSLP** по модели  
Земной системы ИВМ РАН за период 1991–2020 гг.

Месяц	Глобус	Внетроп. часть Южн. полушар.	Тропики	Внетроп. часть Сев. полушар.	Северная Евразия
<i>ACC</i>					
мес1	0.35	0.26	0.51	0.28	0.24
мес2	0.27	0.19	0.44	0.18	0.12
мес3	0.25	0.17	0.41	0.17	0.09
мес4	0.22	0.14	0.39	0.14	0.07
мес1-3	0.41	0.34	0.61	0.29	0.20
мес2-4	0.35	0.27	0.54	0.23	0.15
<i><math>\rho</math></i>					
мес1	0.23	0.18	0.34	0.18	0.16
мес2	0.17	0.12	0.27	0.12	0.08
мес3	0.15	0.11	0.25	0.11	0.06
мес4	0.14	0.10	0.24	0.09	0.03
мес1-3	0.27	0.22	0.39	0.19	0.13
мес2-4	0.21	0.17	0.34	0.14	0.08
<i>RMSE (rПа)</i>					
мес1	2.16	3.54	0.62	2.28	2.53
мес2	2.18	3.38	0.66	2.45	2.77
мес3	2.23	3.23	0.70	2.72	3.12
мес4	2.31	3.08	0.75	3.05	3.47
мес1-3	1.36	2.09	0.45	1.50	1.62
мес2-4	1.42	2.04	0.50	1.69	1.84
<i>MSSS</i>					
мес1	0.02	0.02	0.25	0.02	0.01
мес2	0.07	0.07	0.24	0.05	0.04
мес3	0.07	0.07	0.23	0.06	0.05
мес4	0.07	0.07	0.21	0.07	0.07
мес5	0.06	0.07	0.19	0.04	0.04
мес6	0.06	0.07	0.17	0.04	0.04
мес1-3	0.12	0.13	0.43	0.08	0.05
мес2-4	0.11	0.11	0.36	0.09	0.07
мес1-6	0.15	0.17	0.44	0.09	0.06
<i>ROC_A</i>					
мес1	0.66	0.62	0.74	0.63	0.62
мес2	0.63	0.59	0.70	0.59	0.56
мес3	0.61	0.57	0.69	0.58	0.54
мес4	0.60	0.57	0.67	0.56	0.53
мес1-3	0.69	0.66	0.78	0.63	0.59
мес2-4	0.66	0.63	0.75	0.60	0.56
<i>ROC_N</i>					
мес1	0.55	0.53	0.60	0.53	0.52
мес2	0.53	0.52	0.57	0.52	0.51
мес3	0.53	0.51	0.55	0.52	0.51
мес4	0.53	0.52	0.54	0.52	0.51
мес1-3	0.56	0.53	0.62	0.53	0.52
мес2-4	0.55	0.52	0.60	0.53	0.52
<i>ROC_B</i>					
мес1	0.65	0.62	0.72	0.63	0.60
мес2	0.61	0.58	0.69	0.57	0.54
мес3	0.61	0.57	0.67	0.58	0.54
мес4	0.60	0.56	0.67	0.56	0.52
мес1-3	0.68	0.65	0.77	0.63	0.59
мес2-4	0.65	0.61	0.74	0.60	0.55

Средние оценки качества ретроспективных прогнозов Т2м по модели  
Земной системы ИВМ РАН за период 1991–2020 гг.

Месяц	Глобус	Внетроп. часть Южн. полушар.	Тропики	Внетроп. часть Северн.полушар.	Северная Евразия
<i>ACC</i>					
мес1	0.52	0.45	0.66	0.45	0.37
мес2	0.43	0.33	0.61	0.36	0.27
мес3	0.39	0.28	0.56	0.33	0.26
мес4	0.36	0.25	0.52	0.31	0.26
мес1-3	0.55	0.45	0.70	0.49	0.41
мес2-4	0.49	0.36	0.65	0.44	0.38
<i><math>\rho</math></i>					
мес1	0.37	0.31	0.47	0.32	0.25
мес2	0.30	0.23	0.41	0.24	0.18
мес3	0.26	0.19	0.37	0.21	0.17
мес4	0.24	0.17	0.34	0.21	0.18
мес1-3	0.38	0.32	0.50	0.33	0.28
мес2-4	0.33	0.25	0.44	0.29	0.25
<i>RMSE (°C)</i>					
мес1	0.82	0.96	0.38	1.11	1.49
мес2	0.84	0.93	0.40	1.19	1.63
мес3	0.88	0.90	0.42	1.31	1.81
мес4	0.92	0.86	0.45	1.45	2.00
мес1-3	0.60	0.66	0.31	0.83	1.08
мес2-4	0.64	0.65	0.34	0.92	1.21
<i>MSSS</i>					
мес1	0.04	-0.04	0.32	0.10	0.10
мес2	0.08	0.02	0.32	0.12	0.12
мес3	0.08	0.01	0.29	0.11	0.11
мес4	0.09	0.03	0.26	0.12	0.14
мес1-3	0.15	0.02	0.47	0.21	0.20
мес2-4	0.15	0.02	0.41	0.20	0.21
<i>ROC_A</i>					
мес1	0.73	0.71	0.79	0.70	0.66
мес2	0.70	0.66	0.78	0.66	0.61
мес3	0.68	0.63	0.75	0.64	0.61
мес4	0.66	0.62	0.73	0.64	0.60
мес1-3	0.75	0.71	0.82	0.72	0.68
мес2-4	0.72	0.67	0.79	0.69	0.66
<i>ROC_N</i>					
мес1	0.59	0.57	0.64	0.57	0.55
мес2	0.57	0.54	0.62	0.54	0.52
мес3	0.55	0.53	0.60	0.53	0.52
мес4	0.55	0.53	0.58	0.53	0.52
мес1-3	0.60	0.57	0.66	0.57	0.55
мес2-4	0.58	0.55	0.63	0.55	0.53
<i>ROC_B</i>					
мес1	0.73	0.70	0.79	0.71	0.68
мес2	0.70	0.66	0.77	0.67	0.63
мес3	0.68	0.64	0.75	0.65	0.62
мес4	0.66	0.62	0.73	0.64	0.62
мес1-3	0.75	0.71	0.82	0.73	0.70
мес2-4	0.72	0.67	0.79	0.71	0.68

Средние оценки качества ретроспективных прогнозов **T850** по модели  
Земной системы ИВМ РАН за период 1991–2020 гг.

Месяц	Глобус	Внетроп. часть Южн. полушар.	Тропики	Внетроп. часть Северн. полушар.	Северная Евразия
<i>ACC</i>					
мес1	0.46	0.39	0.57	0.39	0.28
мес2	0.33	0.26	0.53	0.3	0.2
мес3	0.32	0.21	0.49	0.26	0.17
мес4	0.26	0.18	0.43	0.24	0.17
мес1-3	0.49	0.39	0.64	0.41	0.35
мес2-4	0.42	0.28	0.56	0.36	0.3
<i><math>\rho</math></i>					
мес1	0.31	0.27	0.42	0.25	0.18
мес2	0.23	0.18	0.34	0.19	0.12
мес3	0.18	0.12	0.33	0.15	0.12
мес4	0.19	0.12	0.29	0.14	0.14
мес1-3	0.33	0.25	0.45	0.27	0.23
мес2-4	0.27	0.18	0.36	0.24	0.17
<i>RMSE (°C)</i>					
мес1	0.92	1.02	0.47	1.19	1.58
мес2	0.89	1.01	0.5	1.26	1.72
мес3	0.98	0.99	0.46	1.35	1.85
мес4	1.01	0.89	0.54	1.51	2.03
мес1-3	0.66	0.71	0.36	0.92	1.1
мес2-4	0.68	0.74	0.41	0.95	1.27
<i>MSSS</i>					
мес1	0.01	-0.06	0.29	0.07	0.09
мес2	0.06	0	0.3	0.09	0.1
мес3	0.06	-0.02	0.25	0.07	0.08
мес4	0.07	0.01	0.23	0.11	0.09
мес1-3	0.1	0	0.43	0.19	0.17
мес2-4	0.1	0	0.37	0.16	0.18
<i>ROC_A</i>					
мес1	0.7	0.68	0.76	0.68	0.63
мес2	0.67	0.63	0.75	0.63	0.58
мес3	0.66	0.6	0.73	0.61	0.58
мес4	0.63	0.6	0.71	0.61	0.57
мес1-3	0.72	0.68	0.79	0.7	0.65
мес2-4	0.69	0.64	0.76	0.66	0.63
<i>ROC_N</i>					
мес1	0.58	0.56	0.62	0.56	0.54
мес2	0.55	0.53	0.6	0.53	0.51
мес3	0.54	0.51	0.59	0.51	0.51
мес4	0.53	0.52	0.56	0.51	0.5
мес1-3	0.59	0.56	0.65	0.56	0.54
мес2-4	0.56	0.54	0.61	0.53	0.52
<i>ROC_B</i>					
мес1	0.71	0.67	0.77	0.68	0.65
мес2	0.68	0.64	0.75	0.65	0.61
мес3	0.65	0.61	0.73	0.62	0.6
мес4	0.64	0.6	0.7	0.61	0.6
мес1-3	0.73	0.69	0.79	0.7	0.68
мес2-4	0.7	0.64	0.76	0.68	0.65

Средние оценки качества ретроспективных прогнозов **PREC** по модели  
Земной системы ИВМ РАН за период 1991–2020 гг.

Месяц	Глобус	Внетроп. часть Южн. полушар.	Тропики	Внетроп. часть Северн.полушар.	Северная Евразия
<i>ACC</i>					
мес1	0.18	0.16	0.24	0.13	0.13
мес2	0.12	0.09	0.20	0.08	0.05
мес3	0.11	0.07	0.17	0.07	0.05
мес4	0.09	0.07	0.14	0.07	0.06
мес1-3	0.21	0.19	0.29	0.14	0.11
мес2-4	0.17	0.14	0.25	0.12	0.09
<i><math>\rho</math></i>					
мес1	0.14	0.12	0.19	0.12	0.10
мес2	0.09	0.07	0.15	0.06	0.04
мес3	0.08	0.06	0.13	0.06	0.04
мес4	0.07	0.05	0.10	0.06	0.04
мес1-3	0.15	0.13	0.21	0.11	0.08
мес2-4	0.12	0.10	0.17	0.09	0.06
<i>RMSE (мм)</i>					
мес1	1.23	0.85	1.76	1.06	0.91
мес2	1.16	0.79	1.65	1.00	0.84
мес3	1.18	0.81	1.71	0.98	0.79
мес4	1.21	0.86	1.78	0.95	0.71
мес1-3	0.76	0.49	1.15	0.61	0.51
мес2-4	0.77	0.50	1.19	0.59	0.47
<i>MSSS</i>					
мес1	-0.14	-0.05	-0.18	-0.11	-0.13
мес2	0.01	0.05	-0.00	0.03	0.00
мес3	0.03	0.05	0.02	0.04	0.01
мес4	0.04	0.05	0.03	0.04	0.00
мес1-3	0.06	0.07	0.07	0.01	-0.04
мес2-4	0.08	0.08	0.08	0.05	0.00
<i>ROC_A</i>					
мес1	0.59	0.58	0.62	0.57	0.56
мес2	0.56	0.54	0.60	0.54	0.53
мес3	0.55	0.54	0.58	0.54	0.53
мес4	0.55	0.53	0.57	0.54	0.53
мес1-3	0.60	0.59	0.64	0.57	0.56
мес2-4	0.58	0.56	0.62	0.56	0.55
<i>ROC_N</i>					
мес1	0.53	0.52	0.54	0.52	0.52
мес2	0.52	0.51	0.53	0.51	0.51
мес3	0.52	0.51	0.52	0.51	0.51
мес4	0.51	0.51	0.52	0.51	0.51
мес1-3	0.53	0.52	0.55	0.52	0.51
мес2-4	0.52	0.51	0.54	0.51	0.51
<i>ROC_B</i>					
мес1	0.58	0.58	0.60	0.56	0.56
мес2	0.55	0.54	0.57	0.53	0.53
мес3	0.54	0.53	0.55	0.53	0.52
мес4	0.53	0.53	0.54	0.52	0.52
мес1-3	0.59	0.59	0.63	0.57	0.55
мес2-4	0.57	0.57	0.60	0.56	0.54

## Результаты оценки квазиоперативных прогнозов

Отмечается, что для оперативных прогнозов наблюдается та же особенность, что и для ретроспективных прогнозов – при увеличении прогностического периода качество прогнозов незначительно снижается. Исходя из табл. 7–10, разница в оценках качества между детерминистскими и вероятностными прогнозами для территории Северной Евразии и земного шара с прогнозным периодом 0 и 1 месяц варьирует в пределах случайной ошибки. Лучшие оценки получены для детерминистских прогнозов на 2022 год.

Таблица 7

Оценки качества квазиоперативных сезонных прогнозов **T2м**  
с нулевой заблаговременностью по модели Земной системы ИВМ РАН  
для территории **Северной Евразии** за период с июня 2021 по октябрь 2023 г.

Мес[/yr]	ACC	RMSE(°C)	MSSS	ROC_B	ROC_N	ROC_A	ROC_AG
JJA/2021	-0.14	0.98	0.23	0.73	0.54	0.76	0.68
JAS	0.10	0.77	0.32	0.44	0.41	0.39	0.41
ASO	-0.15	1.02	-0.13	0.43	0.48	0.49	0.47
SON	0.28	0.96	0.24	0.57	0.6	0.65	0.61
OND	0.14	1.54	-1.09	0.86	0.63	0.74	0.75
NDJ	0.39	1.22	-0.04	0.67	0.55	0.59	0.6
DJF	0.05	1.46	0.00	0.31	0.57	0.53	0.47
JFM/2022	0.23	1.45	0.14	0.43	0.62	0.54	0.53
FMA	0.47	1.26	0.18	0.62	0.61	0.64	0.62
MAM	0.43	1.10	0.31	0.77	0.63	0.77	0.72
AMJ	0.36	0.87	0.49	0.6	0.54	0.68	0.61
MJJ	0.40	0.80	0.46	0.61	0.57	0.69	0.62
JJA	-0.01	1.02	0.24	0.38	0.59	0.47	0.48
JAS	0.19	0.90	0.33	0.52	0.61	0.68	0.6
ASO	0.37	0.78	0.55	0.56	0.59	0.6	0.58
SON	0.04	1.01	0.17	0.46	0.52	0.55	0.51
OND	0.37	1.16	0.25	0.71	0.62	0.66	0.66
NDJ	0.15	1.68	-0.52	0.55	0.47	0.45	0.49
DJF	0.37	1.39	0.04	0.47	0.47	0.43	0.46
JFM/2023	-0.19	1.74	-0.25	0.32	0.24	0.17	0.24
FMA	-0.02	1.52	-0.18	0.18	0.59	0.51	0.43
MAM	-0.30	1.51	-0.51	0.38	0.45	0.49	0.44
AMJ	-0.06	1.18	-0.49	0.39	0.26	0.25	0.30
MJJ	0.16	0.88	0.16	0.70	0.45	0.48	0.54
JJA	-0.07	1.01	0.24	0.49	0.49	0.46	0.48
JAS	-0.08	1.01	0.48	0.46	0.58	0.57	0.53
ASO	-0.16	1.29	0.36	0.56	0.59	0.60	0.58

Коэффициент корреляции  $ACC$  для T2м по Северной Евразии для прогнозов с нулевой и месячной заблаговременностью варьируется в пределах от -0.3 до 0.47,  $RMSE$  в диапазоне от 0.77 до 1.74,  $MSSS$  в пределах от -1.1 до 0.55,  $ROC_B$  от 0.29 до 0.89,  $ROC_N$  от 0.19 до 0.7,  $ROC_A$  от 0.21 до 0.67.

Таблица 8

Оценки качества квазиоперативных сезонных прогнозов T2м с нулевой заблаговременностью по модели Земной системы ИВМ РАН для территории **земного шара** за период с июня 2021 по октябрь 2023 г.

Мес[/yr]	$ACC$	$RMSE(^{\circ}C)$	$MSSS$	$ROC_B$	$ROC_N$	$ROC_A$	$ROC_{AG}$
JJA/2021	0.10	0.81	-0.08	0.58	0.49	0.6	0.56
JAS	0.29	0.66	0.12	0.54	0.56	0.65	0.59
ASO	0.19	0.83	0.09	0.54	0.57	0.64	0.58
SON	0.31	0.85	0.16	0.59	0.6	0.68	0.62
OND	0.34	0.94	0.01	0.68	0.58	0.71	0.66
NDJ	0.43	0.80	0.08	0.62	0.56	0.67	0.62
DJF	0.26	0.95	-0.09	0.67	0.52	0.65	0.62
JFM/2022	0.13	1.01	-0.23	0.5	0.53	0.53	0.51
FMA	0.42	0.91	-0.18	0.73	0.58	0.71	0.67
MAM	0.35	0.83	0.04	0.67	0.58	0.7	0.65
AMJ	0.45	0.71	0.24	0.67	0.57	0.65	0.63
MJJ	0.44	0.75	0.23	0.66	0.56	0.66	0.63
JJA	0.37	0.79	0.17	0.69	0.61	0.71	0.67
JAS	0.42	0.78	0.23	0.71	0.57	0.72	0.67
ASO	0.56	0.71	0.40	0.73	0.6	0.73	0.69
SON	0.53	0.74	0.35	0.71	0.57	0.72	0.67
OND	0.41	0.86	0.08	0.75	0.56	0.69	0.67
NDJ	0.31	0.99	-0.21	0.68	0.54	0.66	0.63
DJF	0.42	0.83	0.04	0.68	0.55	0.67	0.63
JFM/2023	0.07	1.02	-0.28	0.59	0.51	0.6	0.57
FMA	0.05	1.05	-0.23	0.59	0.52	0.59	0.57
MAM	0.12	1.00	-0.03	0.50	0.53	0.53	0.52
AMJ	0.33	0.94	0.20	0.62	0.56	0.67	0.62
MJJ	0.37	0.90	0.32	0.63	0.59	0.67	0.63
JJA	0.49	0.84	0.46	0.66	0.56	0.67	0.63
JAS	0.37	0.90	0.44	0.67	0.58	0.70	0.65
ASO	0.31	0.90	0.44	0.61	0.62	0.64	0.63

Коэффициент корреляции  $ACC$  для T2м с осреднением по земному шару для прогнозов с нулевой и месячной заблаговременностью варьируется в пределах от 0.05 до 0.56,  $RMSE$  в диапазоне от 0.66 до 1.05,  $MSSS$  в пределах от -0.28 до 0.5,  $ROC_B$  от 0.5 до 0.76,  $ROC_N$  от 0.51 до 0.62,  $ROC_A$  от 0.52 до 0.73.

Оценки качества квазиоперативных сезонных прогнозов **H500**  
с нулевой заблаговременностью по модели Земной системы ИВМ РАН  
для территории **Северной Евразии** за период с июня 2021 по октябрь 2023 г.

Мес[/yr]	<i>ACC</i>	<i>RMSE</i> (°C)	<i>MSSS</i>	<i>ROC_B</i>	<i>ROC_N</i>	<i>ROC_A</i>	<i>ROC_AG</i>
JJA/2021	-0.04	2.02	0.37	0.72	0.53	0.72	0.66
JAS	0.31	1.59	0.56	0.55	0.29	0.29	0.38
ASO	0.01	1.81	0.38	0.83	0.34	0.41	0.52
SON	-0.04	2.00	0.00	0.44	0.68	0.63	0.58
OND	0.32	2.32	-0.00	0.65	0.55	0.58	0.59
NDJ	0.60	2.36	0.29	0.67	0.53	0.75	0.65
DJF	0.39	3.06	0.11	0.47	0.58	0.69	0.58
JFM/2022	0.06	3.43	-0.06	0.56	0.4	0.4	0.47
FMA	-0.03	2.74	-0.33	0.46	0.43	0.43	0.45
MAM	0.37	1.93	0.38	0.78	0.57	0.57	0.71
AMJ	0.51	1.60	0.44	0.76	0.67	0.67	0.75
MJJ	0.18	1.94	0.17	0.75	0.5	0.5	0.61
JJA	-0.41	2.33	0.14	0.34	0.33	0.33	0.32
JAS	0.28	2.06	0.33	0.52	0.43	0.43	0.51
ASO	0.34	2.32	0.32	0.81	0.58	0.58	0.7
SON	0.19	2.48	0.17	0.47	0.55	0.55	0.56
OND	0.39	2.18	0.39	0.52	0.52	0.52	0.56
NDJ	0.06	3.23	-0.02	0.4	0.49	0.49	0.48
DJF	0.11	2.83	0.17	0.54	0.38	0.38	0.49
JFM/2023	-0.44	3.67	-0.38	0.40	0.49	0.42	0.44
FMA	-0.11	2.79	0.06	0.72	0.52	0.43	0.56
MAM	0.23	3.07	0.11	0.52	0.53	0.54	0.53
AMJ	-0.35	2.58	-0.09	0.23	0.46	0.26	0.32
MJJ	0.25	1.70	0.34	0.95	0.50	0.54	0.52
JJA	-0.17	1.67	0.45	0.36	0.59	0.63	0.53
JAS	-0.27	2.46	0.33	0.30	0.54	0.50	0.44
ASO	-0.42	2.07	0.37	0.29	0.33	0.28	0.30

Коэффициент корреляции *ACC* для H500 по Северной Евразии для прогнозов с нулевой и месячной заблаговременностью варьируется в пределах от -0.57 до 0.63, *RMSE* в диапазоне от 1.4 до 3.5, *MSSS* в пределах от -0.26 до 0.6, *ROC\_B* от 0.23 до 0.95, *ROC\_N* от 0.38 до 0.71, *ROC\_A* от 0.38 до 0.74.

Так же как и для других метеозадач, наилучшие оценки для H500 получены для детерминистских прогнозов за 2022 год. Осредненная оценка *ACC* за год при нулевой заблаговременности составила 0.43, а при месячной – 0.45. *RMSE* для нулевой и месячной заблаговременности составляли, соответственно, 2.13 и 2.19. Значения *MSSS* при разных заблаговременностях оказались 0.22 и 0.21, что существенно превышает пороговое значение 0.

Оценки качества квазиоперативных сезонных прогнозов **H500**  
с нулевой заблаговременностью по модели Земной системы ИВМ РАН  
для территории **земного шара** за период с июня 2021 по октябрь 2023 г.

Мес[/yr]	<i>ACC</i>	<i>RMSE</i> (°C)	<i>MSSS</i>	<i>ROC_B</i>	<i>ROC_N</i>	<i>ROC_A</i>	<i>ROC_AG</i>
JJA/2021	0.18	2.08	0.09	0.60	0.39	0.43	0.48
JAS	0.30	1.84	0.21	0.75	0.68	0.80	0.74
ASO	0.43	1.97	0.30	0.85	0.70	0.80	0.78
SON	0.58	2.16	0.37	0.81	0.69	0.78	0.76
OND	0.65	2.19	0.44	0.81	0.69	0.82	0.77
NDJ	0.73	1.93	0.51	0.80	0.67	0.81	0.76
DJF	0.43	2.54	0.21	0.71	0.54	0.65	0.63
JFM/2022	0.11	2.68	-0.06	0.6	0.43	0.47	0.5
FMA	0.41	1.94	0.09	0.62	0.48	0.54	0.55
MAM	0.38	1.76	0.18	0.68	0.62	0.67	0.66
AMJ	0.47	1.56	0.23	0.59	0.62	0.65	0.62
MJJ	0.31	1.73	0.14	0.63	0.52	0.57	0.57
JJA	0.44	1.92	0.28	0.62	0.59	0.63	0.61
JAS	0.43	2.43	0.25	0.69	0.56	0.63	0.63
ASO	0.71	2.22	0.43	0.75	0.62	0.72	0.7
SON	0.62	2.30	0.36	0.76	0.62	0.73	0.7
OND	0.44	2.56	0.22	0.65	0.55	0.65	0.62
NDJ	0.45	2.90	0.20	0.65	0.44	0.58	0.56
DJF	0.42	2.40	0.18	0.65	0.55	0.59	0.6
JFM/2023	0.18	2.44	-0.03	0.69	0.46	0.53	0.56
FMA	0.15	2.58	0.04	0.60	0.53	0.61	0.58
MAM	0.17	2.74	0.05	0.62	0.68	0.74	0.68
AMJ	0.14	2.64	0.08	0.69	0.68	0.74	0.71
MJJ	-0.10	2.58	0.08	0.66	0.71	0.79	0.72
JJA	0.39	2.17	0.37	0.78	0.76	0.86	0.80
JAS	0.37	2.11	0.45	0.84	0.76	0.86	0.82
ASO	0.09	1.95	0.40	0.57	0.71	0.76	0.68

За неполный 2023 год значения качества детерминистских прогнозов оказались наименее успешными по сравнению с предыдущими двумя годами. Осредненная оценка *ACC* за 2023 г. при нулевой заблаговременности составила 0.17, а при месячной – 0.20. *RMSE* для нулевой и месячной заблаговременности составляли 2.40 и 2.35 соответственно. Значение *MSSS* при нулевой заблаговременности оказалось равным 0.18, а при месячной заблаговременности – 0.22. Средние вероятностные оценки за 2023 г. для категории «выше нормы» *ROC\_A* составляли 0.68 при нулевой заблаговременности и 0.71 при месячной заблаговременности, для категории «около нормы» *ROC\_N* составлял 0.66 при нулевой заблаговременности и 0.70 при месячной заблаговременности, а для категории «ниже

нормы»  $ROC_B$  составлял 0.74 при нулевой заблаговременности и 0.70 при месячной заблаговременности.

Согласно проведенному анализу данных, коэффициент корреляции  $ACC$  для H500 с усреднением по земному шару находился в диапазоне от -0.05 до 0.64 для прогнозов с нулевой и месячной заблаговременностью. Значения  $RMSE$  варьировались от 1.54 до 2.81, а  $MSSS$  – от 0 до 0.46. Оценки  $ROC_B$  были в пределах от 0.56 до 0.85,  $ROC_N$  – от 0.43 до 0.79, а  $ROC_A$  – от 0.46 до 0.88.

### **Сравнение качества квазиоперативных сезонных прогнозов по модели Земной системы ИВМ РАН с аналогичными прогнозами зарубежных метеоцентров**

В результате анализа были обнаружены особенности и закономерности сезонной изменчивости оценок качества прогнозов с нулевой заблаговременностью для модели Земной системы ИВМ РАН на территории Северной Евразии в сравнении с оценками других глобальных моделей метеорологических центров.

Отмечается, что пространственные коэффициенты корреляции имеют наиболее выраженную дисперсию значений  $ACC$  сезонных прогнозов геопотенциала на уровне 500 гПа. В период с декабря 2021 по август 2022 года выявлены более однородные значения  $ACC$  и общие тенденции к росту или снижению. Диапазон изменчивости  $ACC$  составляет от -0.6 до 0.6.

Пространственные коэффициенты корреляции для модели Земной системы ИВМ РАН в период с июля по октябрь 2021 г. были примерно на среднем уровне по сравнению с другими моделями. В период с ноября 2021 по май 2022 г., а также с июля по декабрь 2022 г. они были выше среднего, а наибольшие значения были отмечены в ноябре 2021 г. и в марте-апреле 2022 г. Однако с января по апрель 2023 г. коэффициенты корреляции для прогнозов по модели ИВМ РАН были ниже большинства других центров, а наименьшие значения были в июле 2022 г., январе и апреле 2023 года.

Средние оценки качества прогнозов H500 по модели Земной системы ИВМ РАН (**INM-CM5**) и моделям зарубежных метеоцентров за испытываемый прогностический период с 2021 по 2023 год по критериям  $MSSS$ ,  $RMSE$ ,  $ACC$  сведены в табл. 11.

Модели зарубежных метеоцентров: Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (**CMCC**), European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (**ECMWF**), United Kingdom Met Office (**UKMO**), Météo France (**MFR**), Deutscher Wetterdienst (**DWD**), National Centers for Environmental Prediction (**NCEP**), Environment and Climate Change Canada (**ECCC**), Japan Meteorological Agency (**JMA**), Tokio Climate Center (**TCC**).

Оценки качества квазиоперативных сезонных прогнозов INM-CM5 и зарубежных метеоцентров для **H500** с нулевой заблаговременностью по территории **земного шара** и **Северной Евразии**, осредненные за период с июня 2021 г. по октябрь 2023 г.

Модель	Территория земного шара	Северная Евразия
<i>MSSS, H500</i>		
INM-CM5	0.23	0.20
ECMWF	0.26	0.01
NCEP	0.23	0.02
UKMO	0.28	0.12
MFR	0.25	0.13
DWD	0.08	-0.23
CMCC	0.21	0.02
ECCC	0.05	-0.20
JMA	0.28	0.15
TCC	0.38	0.26
<i>RMSE, H500 (дам)</i>		
INM-CM5	2.23	2.36
ECMWF	2.18	2.58
NCEP	2.21	2.56
UKMO	2.14	2.45
MFR	2.18	2.43
DWD	2.39	2.86
CMCC	2.24	2.56
ECCC	2.43	2.83
JMA	2.15	2.42
TCC	1.99	2.26
<i>ACC, H500</i>		
INM-CM5	0.35	0.09
ECMWF	0.44	0.03
NCEP	0.44	0.00
UKMO	0.44	0.06
MFR	0.41	0.06
DWD	0.36	-0.04
CMCC	0.41	0.06
ECCC	0.34	-0.02
JMA	0.44	0.09
TCC	0.57	0.25

### Заключение

Таким образом, результаты испытаний показали, что оценки успешности ансамблевых сезонных вероятностных и детерминистских прогнозов основных метеоэлементов по территории земного шара и по отдельным регионам сопоставимы с оценками успешности ансамблевых прогнозов зарубежных метеоцентров, участвующих в проекте LC MME-WMO, что является свидетельством о соответствии разработанной Системы сезонного метеорологического прогноза на базе модели INM-CM5 мировому уровню.

По итогам рассмотрения и обсуждений представленной Системы сезонного метеорологического прогноза на базе модели INM-CM5 и решения Секции по гидрометеорологическим прогнозам Ученого совета ФГБУ «Гидрометцентр России» Центральная методическая комиссия по гидрометеорологическим и гелиофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета на заседании 22 ноября 2023 г. сочла целесообразным:

«Одобрить и рекомендовать к внедрению в прогностическую работу ФГБУ «Гидрометцентр России» и Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ) «Систему сезонного метеорологического прогноза на базе модели INM-CM5» наряду с использованием ранее внедренных отечественных технологий глобальных сезонных прогнозов Гидрометцентра России и Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова.»

#### Список литературы

1. *Муравьев А.В., Вильфанд Р.М.* О стандартизации оценок качества среднесрочных и долгосрочных прогнозов погоды // *Метеорология и гидрология.* – 2000. – № 12. – С. 24–34.
2. *Струков Б.С., Реснянский Ю.Д., Зеленько А.А.* Релаксационный метод усвоения данных по сплоченности морского льда в модели NEMO-LIM3 с несколькими категориями ледяного покрова // *Метеорология и гидрология.* – 2020. – № 2. – С. 65–77.
3. *Carton J.A., Chepurin G.A., Chen L.* SODA3: A New Ocean Climate Reanalysis // *J. Clim.* – 2018. – Vol. 31. – P. 6967–6983.
4. *Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S.* The ERA5 global reanalysis // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* – 2020. – Vol. 146. – P. 1999–2049.
5. *Standardized Verification System (SVS) for Long-Range Forecasts (LRF).* New Attachment II-9 to the Manual on the GDPS (WMO-No. 485). – Geneva: WMO, 2002. – Vol. I. – 21 pp.
6. *Volodin E.M., Mortikov E.V., Kostykin S.V. et al.* Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5 // *Climate Dynamics.* – 2017. – Vol. 49, no. 11. – P. 3715–3734.
7. *Volodin E.M., Gritsun A.S.* Simulation of Possible Future Climate Changes in the 21st Century in the INM-CM5 Climate Model // *Izvestiya. Atmospheric and Ocean Physics.* – 2020. – Vol. 56, no. 3. – P. 218–228. – DOI: 10.1134/S0001433820030123.
8. *Vorobyeva V., Volodin E.* Evaluation of the INM RAS climate model skill in climate indices and stratospheric anomalies on seasonal timescale // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography.* – 2021. – Vol. 73, no. 1. – P. 1–12.