

*В.А. Тищенко^{1,2}, В.М. Хан^{1,2}, Ю.Д. Реснянский¹,
Е.М. Володин^{2,1}, А.С. Грицун², В.В. Воробьева^{2,1}, М.А. Тарасевич^{2,1}*

**Метод сверхдолгосрочного прогнозирования
состояния климатической системы
на основе климатической модели ИВМ РАН INM-CM5
и системы подготовки данных Гидрометцентра России**

¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр

Российской Федерации, г. Москва;

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

Введение

ФГБУ «Гидрометцентр России» совместно с ФГБУН «Институт вычислительной математики имени Г.И. Марчука РАН» разработана технология глобального ансамблевого сверхдолгосрочного прогноза. Технология ансамблевого прогноза построена на базе глобальной климатической модели INM-CM5 [7, 8] и системы генерации ансамбля начальных состояний [9].

Основными блоками модели являются: блок динамики атмосферы, аэрозольный блок, блок динамики океана, дополненный блоком динамики и термодинамики морского льда. Разрешение в атмосферном блоке составляет $2^\circ \times 1.5^\circ$ по долготе и широте, 73 σ -уровня до высоты порядка 60 км, в океанском блоке $0.5^\circ \times 0.25^\circ$ по долготе и широте и 40 σ -уровней по вертикали. Модель участвует в программе по сравнению климатических моделей CMIP6. Для данной конфигурации модели проведена верификация динамических процессов в стратосфере и тропосфере, воспроизведения моделью Эль-Ниньо и других наиболее важных погодно-климатических явлений. В публикациях авторов [7–9] показано, что качество воспроизведения моделью INM-CM5 крупномасштабных процессов соответствует лучшим современным моделям.

Для обеспечения возможности расчета сверхдолгосрочных прогнозов на вычислительном комплексе ФГБУ «ГВЦ Росгидромета» Cray XC40-LC в квазиоперативном режиме реализована автоматическая система построения начального состояния. Расчет

ансамбля прогнозов происходит автоматически в несколько этапов, выполняемых последовательно: создание набора начальных состояний для климатической модели ИВМ РАН на требуемую дату начала прогноза, запуск счета ансамбля прогнозов на вычислительном комплексе ФГБУ «ГВЦ Росгидромета» Cray XC40-LC, подготовка результатов прогноза для дальнейшей обработки и использования в Гидрометцентре России.

Начальные состояния атмосферы, океана и суши для сверхдолгосрочных прогнозов задаются в терминах аномалий: «климатология модели + аномалия реанализа на момент старта прогноза». Выбор такого способа задания условий «в виде аномалий» определяется стремлением избежать шокового воздействия больших отклонений задаваемого начального поля от состояния модели с приспособленной собственной динамикой.

Для построения начальных состояний на дату старта прогноза используются данные реанализа ERA40 [6] (1960–1979 гг.), ERA5 [4] (с 1980 г.) для атмосферы и деятельного слоя суши; а также анализов ORAS5 [10] (1960–1979 гг.), SODA3.4.2 [3] (1980–2020 гг.) и GODAS НМС [2] (с 2021 г.) для океана и морского льда. Ансамбль начальных состояний (15 членов ансамбля) получен путем внесения в начальное состояние температуры воздуха на всех σ -уровнях модели в каждой точке модельной сетки гладкого длинноволнового возмущения с амплитудой 0.1 К.

Расчеты с моделью INM-CM5 проводятся на высокопроизводительном вычислительном комплексе (ВБК) Cray XC40-LC. На 720 ядрах расчет одного члена ансамбля сверхдолгосрочного прогноза на 15 лет выполняется 36 часов. Выходная прогностическая продукция записывается в базу данных SLME системы АССОИ Гидрометцентра России.

Протокол испытаний

В соответствии с Планом испытания новых и усовершенствованных технологий (методов) гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов Росгидромета на 2023 год, утвержденным Руководителем Росгидромета, были подготовлены и проведены испытания метода сверхдолгосрочного прогнозирования состояния климатической системы на основе климатической модели ИВМ РАН INM-CM5 и системы подготовки данных Гидрометцентра России. Под сверхдолгосрочными прогнозами в данном случае подразумеваются прогностические интервалы от года до пятилетия. В качестве объекта рассматривались следующие метеоэлементы:

- давление на уровне моря (MSLP);
- высота геопотенциала на уровне 500 гПа (H500);
- температура у земной поверхности (T2m);

– осадки (PREC).

Оперативные испытания метода ансамблевого сверхдолгосрочного прогноза на основе модели INM-CM5 были произведены для периода с 1960 по 2022 год.

Оценки успешности среднегодовых и средних за пять лет прогнозов атмосферного давления на уровне моря, геопотенциала поверхности 500 гПа, приземной температуры воздуха и количества осадков рассчитывались с учетом наставлений Всемирной метеорологической организации (ВМО) [1, 5], а также с учетом регламента выпуска прогнозов в Ведущем центре ВМО по прогнозированию климата от года до десятилетия (<https://hadleyserver.metoffice.gov.uk/wmolc/>).

Были рассмотрены следующие показатели успешности прогнозов: коэффициент корреляции аномалий (ACC), среднеквадратичная мера мастерства (MSSS) для детерминистского прогноза, относительная оперативная характеристика (площадь под кривой ROC) для двухкатегорийного вероятностного прогноза – использовались равновероятные категории выше/ниже нормы, аномалии рассчитывались относительно базового периода 1991–2020 гг. Показатель ROC, равный единице, свидетельствует об идеальном прогнозе. Показатель ROC выше 0.5 ($HR \leq FAR$) свидетельствует о том, что прогноз квалифицированный.

В качестве контрольных данных использовался реанализ ERA5.

39

Оценки ансамблевого сверхдолгосрочного прогноза были представлены по территории земного шара и крупным регионам Северного и Южного полушарий (табл. 1).

Таблица 1

Границы регионов, для которых представлены оценки ансамблевого
сверхдолгосрочного прогноза

| Регион | | Диапазон широт | | Диапазон долгот | |
|------------------------|--------------|----------------|-----|-----------------|-----|
| Глобус | Globe | -90 | 90 | 0 | 360 |
| Южные экстратропики | S_Ex_trop | -90 | -20 | 0 | 360 |
| Тропики | Tropic | -20 | 20 | 0 | 360 |
| Северные экстратропики | N_Ex_trop | 20 | 90 | 0 | 360 |
| Северная Евразия | N_Eurasia | 35 | 75 | 20 | 180 |
| ЕТР | ETR | 40 | 70 | 20 | 60 |
| Северо-Восточная Азия | NE_Asia | 35 | 75 | 60 | 180 |
| Европа | Europe | 30 | 70 | 0 | 60 |
| Центральная Азия | Central_Asia | 35 | 55 | 50 | 85 |
| Сибирь | Siberia | 50 | 75 | 60 | 110 |
| Дальний Восток | Far_East | 45 | 75 | 110 | 180 |

Особое внимание было уделено региону Северной Евразии, для которого были выделены однородные по физико-географическим условиям регионы. Интерес к данному региону обусловлен деятельностью Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ), который, выполняя рекомендации ВМО, осуществляет климатическое обслуживание территории Северной Евразии.

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

Результаты испытаний

Показатели *MSSS* для всех крупных районов при годовом и 5-летнем осреднении положительные для T2m и H500. Значения *ROC* варьировались от 0.5 до 0.95 и стабильно превышали 0.5, что свидетельствовало о квалифицированном прогнозе. Оценки *ACC* между контрольными и прогностическими данными для T2m, MSLP и H500 также были достаточно высокие и превышали в большинстве районов пороговые значения со статистической значимостью 95 %. Также было отмечено, что согласованность временной изменчивости между контрольными и прогностическими данными для 5-летнего прогноза выше, чем для годового. Основные результаты оценок по *ACC* и *ROC* представлены в табл. 2.

Значения пространственных коэффициентов *ACC* глобальной приземной температуры воздуха для всех временных масштабов прогноза свидетельствуют о согласованности прогностических данных и данных реанализа: 0.62 за первый год и 0.75 за срок с 1 по 5 годы прогноза. При этом в Северной Евразии данный показатель выше: 0.69 и 0.84 соответственно. Тот же уровень качества характерен для прогнозов геопотенциала с более высокой успешностью для всего земного шара. Для приземного атмосферного давления и для осадков коэффициенты пространственной корреляции низкие (0.06–0.16), при этом значения относительной оперативной характеристики *ROC* не ниже 0.5. Также представленные оценки позволяют сделать вывод, что коэффициенты корреляции аномалий и значения *ROC* у средних за 5-летний срок прогнозов выше, чем у прогнозов на первый год.

Анализ пространственного распределения коэффициента *ACC* приземной температуры свидетельствует о наиболее высоком качестве прогнозов на сроки от 1 до 5 лет, причем самые высокие значения *ACC* (выше 0.9) отмечаются на юге Европы, севере Африки, в Средней Азии, на юге Северной Америки и в центре Южной Америки. Для прогнозов на 1-й год области наиболее успешного прогноза те же, но значения *ACC* чуть ниже. В пространственном распределении *ACC* осадков выделяется небольшая область в южной половине Африканского континента, где $ACC < 0.2$, на территории Северной Евразии низкие значения *ACC* отмечаются в южных районах Европейской территории и в Средней Азии.

Оценка качества прогнозов модели INM-CM5 за 1 год прогноза и среднее за 1–5 лет

| | ACC1 | ACC5 | ROC1 | ROC5 | MSSS1 | MSSS5 |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| T2m | | | | | | |
| Globe | 0.62 | 0.75 | 0.77 | 0.83 | 0.21 | 0.00 |
| S_Ex_trop | 0.44 | 0.60 | 0.68 | 0.74 | -0.04 | -0.33 |
| Tropic | 0.75 | 0.84 | 0.83 | 0.87 | 0.42 | 0.22 |
| N_Ex_trop | 0.68 | 0.82 | 0.80 | 0.88 | 0.24 | 0.11 |
| N_Eurasia | 0.65 | 0.84 | 0.79 | 0.90 | 0.13 | -0.11 |
| ETP | 0.68 | 0.87 | 0.81 | 0.95 | 0.29 | 0.31 |
| NE_Asia | 0.63 | 0.82 | 0.77 | 0.88 | 0.07 | -0.27 |
| Europe | 0.74 | 0.89 | 0.84 | 0.94 | 0.37 | 0.44 |
| Central_Asia | 0.64 | 0.87 | 0.81 | 0.92 | 0.16 | 0.17 |
| Siberia | 0.57 | 0.85 | 0.72 | 0.88 | 0.11 | 0.28 |
| Far_East | 0.65 | 0.82 | 0.79 | 0.88 | -0.03 | -0.55 |
| MSLP | | | | | | |
| Globe | 0.24 | 0.25 | 0.59 | 0.61 | -0.01 | -0.21 |
| S_Ex_trop | 0.26 | 0.37 | 0.58 | 0.66 | -0.01 | -0.12 |
| Tropic | 0.35 | 0.23 | 0.64 | 0.61 | 0.08 | -0.09 |
| N_Ex_trop | 0.12 | 0.14 | 0.54 | 0.55 | -0.12 | -0.43 |
| N_Eurasia | 0.08 | 0.09 | 0.54 | 0.55 | -0.20 | -0.89 |
| ETP | 0.02 | 0.05 | 0.52 | 0.55 | -0.23 | -1.13 |
| NE_Asia | 0.10 | 0.09 | 0.54 | 0.55 | -0.19 | -0.82 |
| Europe | 0.05 | -0.04 | 0.52 | 0.50 | -0.24 | -1.09 |
| Central_Asia | -0.00 | 0.07 | 0.52 | 0.56 | -0.43 | -1.58 |
| Siberia | 0.03 | 0.12 | 0.50 | 0.52 | -0.16 | -0.78 |
| Far_East | 0.13 | 0.07 | 0.56 | 0.55 | -0.13 | -0.62 |
| PREC | | | | | | |
| Globe | 0.14 | 0.13 | 0.56 | 0.56 | -0.21 | -0.37 |
| S_Ex_trop | 0.16 | 0.21 | 0.57 | 0.59 | -0.13 | -0.22 |
| Tropic | 0.13 | 0.06 | 0.57 | 0.54 | -0.38 | -0.51 |
| N_Ex_trop | 0.12 | 0.11 | 0.56 | 0.56 | -0.13 | -0.39 |
| N_Eurasia | 0.05 | -0.01 | 0.53 | 0.52 | -0.19 | -0.67 |
| ETP | -0.01 | -0.09 | 0.51 | 0.50 | -0.15 | -0.55 |
| NE_Asia | 0.06 | 0.00 | 0.54 | 0.52 | -0.21 | -0.74 |
| Europe | 0.03 | 0.04 | 0.52 | 0.53 | -0.14 | -0.35 |
| Central_Asia | -0.02 | -0.07 | 0.50 | 0.50 | -0.19 | -0.38 |
| Siberia | 0.02 | 0.01 | 0.53 | 0.53 | -0.19 | -0.77 |
| Far_East | 0.05 | -0.04 | 0.53 | 0.51 | -0.26 | -1.06 |
| H500 | | | | | | |
| Globe | 0.66 | 0.78 | 0.78 | 0.89 | 0.39 | 0.28 |
| S_Ex_trop | 0.48 | 0.61 | 0.70 | 0.80 | 0.22 | 0.10 |
| Tropic | 0.87 | 0.91 | 0.89 | 0.97 | 0.65 | 0.46 |
| N_Ex_trop | 0.64 | 0.82 | 0.77 | 0.89 | 0.33 | 0.30 |
| N_Eurasia | 0.60 | 0.85 | 0.74 | 0.91 | 0.22 | 0.29 |
| ETP | 0.56 | 0.86 | 0.72 | 0.96 | 0.24 | 0.43 |
| NE_Asia | 0.60 | 0.84 | 0.75 | 0.90 | 0.21 | 0.23 |
| Europe | 0.61 | 0.87 | 0.74 | 0.92 | 0.28 | 0.44 |
| Central_Asia | 0.61 | 0.83 | 0.78 | 0.93 | 0.19 | -0.05 |
| Siberia | 0.48 | 0.80 | 0.68 | 0.89 | 0.09 | 0.24 |
| Far_East | 0.58 | 0.82 | 0.73 | 0.87 | 0.17 | 0.24 |

В арктической зоне Евразии прогнозы осадков более успешны для всех прогностических сроков. Низкое качество прогнозов атмосферного давления на уровне моря наблюдается над Индийским океаном и на востоке Тихого океана у побережья Южной Америки. Для территории Северной Евразии коэффициенты корреляции заметно выше.

Сравнение качества среднегодовых и пятилетних прогнозов по модели INM- CM5 с аналогичными прогнозами зарубежных метеоцентров

Анализ успешности ансамблевых сверхдолгосрочных прогнозов (за первый год прогноза и среднего за пятилетие) на основе модели INM-CM5 сопоставлялся с результатами аналогичных прогнозов, выпущенных ведущими международными метеорологическими центрами, участвующими в консорциуме по годовому и десятилетнему прогнозированию ВМО (LC-ADCP WMO) (<https://hadleyserver.metoffice.gov.uk/wmolc/>). Среднегодовые значения прогнозов метеопараметров, рассматриваемых для испытания, за первый год и за 5-летний прогностический периоды сравнивались с другими прогнозами по формату прогнозов LC-ADCP. Для оценки успешности использовался коэффициент корреляции аномалий и показатель ROC для вероятностных прогнозов по двум градациям: выше или ниже средних значений. При расчетах аномалий учитывался базовый период с 1991 по 2020 год.

Оценки качества показали, что модель INM-CM5 демонстрирует высокую результативность в воспроизведении среднегодового температурного режима как на прогностический период в 1 год, так и на более длительный период – 5 лет, что подтверждено данными табл. 3. При этом климатическая модель ИВМ РАН выделяется среди прочих анализируемых моделей ведущих мировых климатических центров высоким коэффициентом корреляции: 0.62 за первый год прогноза и 0.75 для прогноза на осредненный 5-летний период. Следует отметить, что и скомплексированный прогноз по ансамблю моделей LC-ADCP также показывает сопоставимые результаты с коэффициентами корреляции на уровне 0.62 за один год и 0.71 за 5 лет. Кроме того, результаты оценок ROC также демонстрируют хорошую успешность модели INM-CM5. Значения ROC равны 0.77 на первый год и 0.83 для 5-летнего периода, тогда как для прогноза мультиансамбля моделей LC-ADCP эти показатели составляют 0.80 и 0.85 соответственно.

Помимо температурного режима, был проведен сравнительный анализ воспроизведения межгодовой изменчивости осадков, давления на уровне моря и высоты геопотенциала на уровне 500 гПа с целью оценки успешности вероятностных и детерминистских прогнозов этих параметров на фоне прогнозов зарубежных метеоцентров. Результаты показали (таблицы не приводятся), что сверхдолгосрочные прогнозы по моделям

Земной системы ИВМ РАН и ведущих зарубежных метеоцентров обладают сопоставимой точностью в прогнозировании межгодовой изменчивости указанных метеопараметров.

Таблица 3

Сравнительные оценки воспроизведения среднегодового температурного режима за первый год прогноза и среднего за пятилетие по ретроспективным прогнозам моделей ВМО (1960–2018) и модели INM-CM5 (1960–2020)

| Модель | 1 год | | 1–5 годы | |
|---------------------|-------------|------------|------------|------------|
| | <i>ACC</i> | <i>ROC</i> | <i>ACC</i> | <i>ROC</i> |
| INM-CM5 | 0,62 | 0,77 | 0,75 | 0,83 |
| Среднее по ансамблю | 0,62 | 0,80 | 0,71 | 0,85 |
| BCCR | 0,51 | 0,74 | 0,65 | 0,81 |
| BSC | 0,53 | 0,75 | 0,64 | 0,81 |
| CCCMA | 0,57 | 0,77 | 0,66 | 0,82 |
| CMCC | 0,5 | 0,74 | 0,63 | 0,8 |
| CSIRO | 0,46 | 0,71 | 0,56 | 0,76 |
| DWD | 0,53 | 0,76 | 0,66 | 0,81 |
| GFDL | 0,57 | 0,77 | 0,67 | 0,82 |
| LASG | 0,43 | 0,69 | 0,58 | 0,77 |
| MIROC | 0,51 | 0,74 | 0,63 | 0,81 |
| MOHC | 0,55 | 0,76 | 0,66 | 0,82 |
| MRI | 0,55 | 0,76 | 0,67 | 0,82 |
| SMHI/DMI | 0,49 | 0,73 | 0,65 | 0,82 |

Заключение

Таким образом, результаты испытаний показали, что оценки успешности ансамблевых 5-летних вероятностных и детерминистских прогнозов основных метеозаэментов по территории земного шара и по отдельно взятым регионам сопоставимы с оценками успешности ансамблевых прогнозов зарубежных метеоцентров, участвующих в проекте LC-ADCP WMO, что является свидетельством о соответствии разработанного метода сверхдолгосрочного метеорологического прогноза на базе модели INM-CM5 мировому уровню.

Результаты проведенных испытаний были представлены к рассмотрению на заседании секции Ученого Совета по метеорологическим прогнозам Гидрометцентра России 27.09.2023. Секция Ученого совета постановила одобрить работу по созданию в Гидрометцентре России метода глобального ансамблевого прогноза на сверхдолгосрочных временных масштабах на основе климатической модели INM-CM5. На заседании Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета

22 ноября 2023 года данный метод был одобрен и рекомендован к внедрению в качестве основного в ФГБУ «Гидрометцентр России» и в Северо-Евразийском климатическом центре.

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., Зеленко 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. *Uppala S.M., K  llberg P.W., Simmons A.J., Andrae U., da Costa Bechtold V., Fiorino M., Gibson J.K., Haseler J., Hernandez A., Kelly G.A., Li X., Onogi K., Saarinen S., Sokka N., Allan R.P., Andersson E., Arpe K., Balmaseda M.A., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Caires S., Chevallier F., Dethof A., Dragosavac M., Fisher M., Fuentes M., Hagemann S., H  lm E., Hoskins B.J., Isaksen L., Janssen P.A.E.M., Jenne, R., McNally A.P., Mahfouf J.-F., Morcrette J.-J., Rayner N.A., Saunders R.W., Simon P., Sterl A., Trenberth K.E., Untch A., Vasiljevic D., Viterbo P., Woollen J.* The ERA-40 re-analysis // *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 2005. – Vol. 131. – P. 2961–3012. – <https://doi.org/10.1256/qj.04.176>.
7. *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.
8. *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.
9. *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.
10. *Zuo H., Balmaseda M.A., Tietsche S., Mogensen K., Mayer M.* The ECMWF operational ensemble reanalysis-analysis system for ocean and sea ice: a description of the system and assessment // *Ocean Sci.* – 2019. – Vol. 15. – P. 779–808. – <https://doi.org/10.5194/os-15-779-2019>.