

Исследование предсказуемости погоды и климата на сезонном временном масштабе с помощью климатической модели ИВМ РАН*

Е.М. Володин, В.В. Воробьева, М.А. Тарасевич

Рассматривается система воспроизведения аномалий погоды на сезонных временных масштабах, созданная на основе модели климата ИВМ РАН. Модель состоит из блока динамики атмосферы, включая модель поверхности и почвы, блока динамики океана и морского льда и аэрозольного блока. Начальные состояния задавались как аномалии состояния атмосферы, океана и морского льда, вычисленные по атмосферным и океанским реанализам, добавленные к модельному климату. Рассмотрено воспроизведение аномалий декабря–февраля и июня–августа 1980–2014 гг. Показано, что модель воспроизводит многие особенности атмосферной циркуляции рассмотренных летних и зимних сезонов, включая аномалии, связанные с индексами Северо-Атлантического колебания (NAO), Тихоокеанско-Североамериканского колебания (PNA). Показано, что показатели качества воспроизведения аномалий прошлых лет соответствуют аналогичным показателям качества для существующих на настоящий момент мировых прогностических центров. Рассмотрены оперативные прогнозы, выполненные с помощью этой системы, для летнего сезона 2022 г. Показана возможность применения этой системы в оперативном режиме.

Ключевые слова: модель, климат, погода, аномалия, атмосфера, океан, корреляция, прогноз.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №20-05-00673).

Введение

В последние годы ведущие прогностические центры придерживаются концепции бесшовного прогноза [1], согласно которой для прогноза погоды различной заблаговременности от суток до сезона и десятилетия и для моделирования климата на несколько десятков или сотен лет должна использоваться одна и та же модель. В связи с этим задача сезонного прогноза с помощью модели ИВМ РАН, которая изначально разрабатывалась как климатическая, является своевременной и актуальной. Развитие сезонного прогноза погоды происходило таким образом, что численные модели, используемые для краткосрочного и среднесрочного прогноза, то есть на срок от суток до одной-двух недель, начинали применяться и на сезонном временном масштабе. Такова, например, модель ПЛАВ, использующаяся для прогноза на срок от нескольких суток до сезона в Гидрометцентре Российской Федерации [2]. В настоящем проекте представлен другой подход, когда для сезонного прогноза применяется модель, изначально разработанная для численных экспериментов по воспроизведению климата. При верификации долгосрочного прогноза наиболее важным фактором, определя-

ющим качество составленного прогноза, является оценка способности модели воспроизводить характерные для данного временного масштаба процессы.

В данной работе рассматривается способ составления начальных данных, оценка воспроизведения моделью аномалий зимних и летних сезонов 1980–2014 гг., а также возможность использования разработанной технологии в оперативном режиме.

Модель, начальные данные и методология проведения численных экспериментов

Для численных экспериментов по воспроизведению сезонных аномалий погоды используется модель климата INMCM50 [3], состоящая из блока динамики атмосферы, динамики океана и аэрозольного блока. В блоке динамики атмосферы уравнения решаются на сетке с разрешением



ВОЛОДИН

Евгений Михайлович
Институт вычислительной
математики им. Г.И. Марчука
РАН



ВОРОБЬЕВА

Василиса Васильевна
Институт вычислительной
математики им. Г.И. Марчука
РАН



ТАРАСЕВИЧ

Мария Александровна
Институт вычислительной
математики им. Г.И. Марчука
РАН

2°×1.5° по долготе и широте и 73 уровнями по вертикали с верхней границей на высоте около 60 км. Шаг по времени составляет 3 минуты. Уравнения динамики океана решаются на сетке 0.5°×0.25° и 40 уровней по вертикали с шагом по времени 12 минут.

Для воспроизведения условий декабря–февраля использовались начальные состояния атмосферы и океана на 1 ноября соответствующих лет, для воспроизведения условий июня–августа – начальные состояния на 1 мая.

Сначала с моделью по протоколу CMIP6 был проведен исторический модельный эксперимент 1980–2014 гг. для получения климатологии модели на 1 ноября и 1 мая. Для создания набора данных для океанического блока модели использованы среднемесячные данные реанализа Simple Ocean Data Assimilation (SODA) 3.4.2 [4] за октябрь и ноябрь, а также апрель и май 1980/81–2014/15 гг., а именно: практической солёности, потенциальной температуры, уровня моря, массы и толщины льда, концентрации льда в пяти градациях толщины.

Например, данные за 1 ноября вычисляются как среднее арифметическое данных за октябрь и ноябрь. Обработка данных реанализа состояла в следующем. Сначала произведено суммирование данных концентрации льда по всем градациям, поскольку в модели INMCM50 отсутствует подобная классификация льда по градациям. После чего была вычислена аномалия данных реанализа для каждого года из диапазона 1980–2014 гг. по отношению к климатологии реанализа и интерполирована на модельную сетку. Итоговое значение данных за первое ноября каждого года из диапазона 1980–2014 гг. получено суммированием климатологии модели и аномалии реанализа для рассматриваемого года.

Решена проблема несогласованности доли ячейки, покрытой льдом, и толщины льда, которая возникла, поскольку начальные данные указанных метеополей вычислялись отдельно. Для этого было введено искусственное ограничение на зна-

чение массы льда в ячейке так, чтобы толщина льда была не больше 1 800 см и не меньше 0.01 см. Кроме того, на модельной сетке существуют точки, в которых одно из слагаемых (климатология модельных данных за 1 ноября или аномалия данных реанализа) показывает наличие льда, а второе указывает на его отсутствие. В некоторых точках модельной сетки значения получились отрицательными в связи с отрицательной аномалией данных реанализа. В этом случае начальные данные задавались равными нулю. В силу отсутствия данных реанализа в Черном море и некоторых других внутренних водоемах возникали нереалистично большие значения аномалии солёности (до 5‰). Принято решение ограничить значения модуля аномалии солёности во внутренних водоемах 1‰, а в Черном море задать их равными нулю.

При создании начальных данных для атмосферного блока модели использованы данные температуры и удельной влажности воздуха, водноэквивалентной толщины снега, U и V – компонент скорости ветра, давления на поверхности, температуры поверхности, температуры и влажности почвы, взятые из реанализа ERA-Interim [5] на 1 ноября 1980–2014 гг. Технология создания набора начальных данных аналогична используемой при составлении набора начальных данных для океанического блока, отличие заключается в использовании модифицированной формулы устранения дрейфа модельного климата по отношению к реальному для водноэквивалентной толщины снега, температуры и влажности почвы с целью приведения значений физических величин к одному диапазону значений. В модифицированной формуле аномалия реанализа домножается на отношение среднеквадратичных отклонений значений переменных по данным модели и реанализа за 1 ноября 1980–2014 гг.

На основе составленного набора начальных данных на 1 ноября 1980–2014 гг. с климатической моделью INMCM50 проведены серии из 10 экспериментов сезонного временного масштаба для каждого года из диапазона 1980–2014 гг. Каждый эксперимент начинался 1 ноября и имел продолжительность 5 месяцев. Ансамбль результатов для каждого года получен отклонением начальных данных температуры воздуха на величину порядка 0.02 К и V -компоненты скорости ветра на величину порядка 0.02 м/с от исходного значения. Аналогичным образом были устроены и численные эксперименты, стартовавшие с 1 мая для воспроизведения аномалий погоды в июне–августе соответствующих лет.

Воспроизведение аномалий погоды в декабре–феврале

По результатам экспериментов для всех зимних сезонов, начинающихся с 1980–2014 гг., был проведен расчет коэффициентов корреляции аномалий для шести

метеополей (температуры на высоте 2 м, температуры на 850 гПа, геопотенциалов изобарических поверхностей 200 гПа и 500 гПа, осадков и давления на уровне моря) в четырех регионах: глобально по всему земному шару, в тропиках (20° ю.ш. – 20° с.ш.), во внетропической части Северного полушария (20° с.ш. – 90° с.ш.) и Южного полушария (90° ю.ш. – 20° ю.ш.). В вычислениях использовались среднемесячные данные осадков реанализа GPCP v.2.3 [6] и реанализа ERA-Interim для всех остальных метеополей, предварительно интерполированные на сетку модели. Для большинства полей коэффициенты корреляции имеют наибольшие значения в тропиках, что обусловлено явлениями Эль-Ниньо, обеспечивающими большую климатическую предсказуемость в регионе. Анализ коэффициентов корреляции аномалий температуры на уровне 2 м в тропиках для каждого зимнего сезона показывает увеличение корреляции в годы явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья.

Построены графики коэффициентов корреляции среднемесячной температуры воздуха и U -компоненты скорости ветра в модели INMCM50 и реанализе ERA-Interim, осредненных вдоль круга широт и с 60° с.ш. по 88° с.ш. для температуры воздуха и с 60° с.ш. по 70° с.ш. для скорости ветра на различных высотах. Области высоких значений корреляции для температуры воздуха в стратосфере имеются на протяжении всего расчетного периода, чего не наблюдается для полей U -компоненты скорости ветра и геопотенциала, поскольку для температуры воздуха имеется отрицательный тренд порядка -1 К в 10 лет, связанный с ростом концентрации CO_2 и уменьшением содержания озона как в модели, так и в реанализе, а для U -компоненты скорости ветра и геопотенциала тренд менее значим. Корреляция U -компоненты скорости ветра уменьшается до значений, близких к нулевым в конце расчетного периода, поскольку скорость ветра зависит от градиента температуры сильнее, чем от самой температуры, но тренд градиента температуры, вызванного антропогенным воздействием, не является ярко выраженным. Из литературы известно, что четкое нисходящее распространение областей высокой корреляции от средней стратосферы к нижней стратосфере в полях U -компоненты скорости ветра и геопотенциала в начале зимы может быть связано с сезонной изменчивостью стратосферной циркуляции, а также с возникновением внезапных стратосферных потеплений (ВСП), сопутствующих событиям Эль-Ниньо – Южного колебания (ЭНЮК) (в [7] указано, что ВСП имеют тенденцию происходить преимущественно во время зимних сезонов Эль-Ниньо). Было посчитано количество модельных явлений ВСП в зимних сезонных прогнозах, возникающих в сезоны явлений Эль-Ниньо, Ла-Нинья и при отсутствии указанных явлений. Сделан вывод

об отсутствии ярко выраженной взаимосвязи между возникновением событий ВСП и явлениями ЭНЮК в модели INMCM50.

Проведено сравнение графиков средней вдоль экватора U -компоненты скорости ветра на уровнях давления от 10 до 70 мбар в зимние сезоны 1980–1981 гг. (сезон наиболее сильных западных ветров за всю историю метеонаблюдений) и 2005–2006 гг. (сезон наиболее сильных восточных ветров за всю историю метеонаблюдений), построенной по модельным данным, с аналогичной картиной для реанализа ERA-Interim. Сделан вывод о совпадении фаз квазидвухлетнего колебания в реанализе и сезонных экспериментах климатической модели ИВМ РАН.

По результатам экспериментов для зимних сезонов 1980–2014 гг. был проведен расчет индексов Североатлантического (NAO) и Тихоокеанско-Североамериканского (PNA) колебаний. Вычислен коэффициент корреляции временных рядов значений среднего за зимний сезон индекса NAO за период 1991–2010 гг. для климатической модели INMCM50 и реанализа ERA-Interim – 0.71, для климатической модели INMCM50 и инструментальных данных CRU (Climate Research Unit) – 0.68. Временные ряды наблюдаемого и модельного индекса NAO приведены на *рис. 1*.

В [8] показана возможность сезонного прогнозирования проекции аномалии среднемесячной температуры воздуха в стратосфере на первую эмпирическую ортогональную функцию (ЭОФ) среднемесячной температуры воздуха в течение декабря–марта в годы с большими значениями среднезонального меридионального потока тепла в декабре. В связи с этим за основной индекс, характеризующий динамику стратосферы, принято значение проекции аномалии среднемесячной температуры воздуха модели (аномалия вычислена по отношению к модельной климатологии 1980–2014 гг.) на предварительно вычисленную первую ЭОФ среднемесячной

температуры воздуха реанализа ERA-Interim. Для оценки результатов модели INMCM50 аналогичный индекс был вычислен по данным реанализа ERA-Interim как проекция аномалии среднемесячной температуры воздуха реанализа по отношению к климатологии реанализа за 1980–2014 гг. на предварительно вычисленную первую ЭОФ реанализа. Коэффициент корреляции временных рядов значений индекса за зимние сезоны 1980–2014 гг. для модели и реанализа достигает значения 0.47, что меньше, чем коэффициент корреляции индексов NAO. Таким образом, стратосферная изменчивость вносит значительный вклад, но, вероятно, является не единственной причиной предсказуемости индекса NAO. Начальное состояние тропосферы может так же играть важную роль в высоком качестве прогноза индекса Североатлантического колебания.

Коэффициенты корреляции индексов PNA для модели INMCM50 и реанализа ERA-Interim, вычисленные для каждого месяца с ноября по февраль 1980–2015 гг. отдельно и в среднем за зимние сезоны, показывают приемлемый результат. Как для модели, так и для реанализа в годы наиболее сильных явлений Эль-Ниньо (1982–1983, 1997–1998) значения индекса PNA положительны, а в годы наиболее ярко выраженных явлений Ла-Нинья (2007–2008, 2010–2011) – отрицательны. Значения коэффициентов корреляции индексов PNA для модели INMCM50 и реанализа ERA-Interim уменьшаются с течением времени, что объясняется приближением состояния модели к модельному климату. Среднее за зимний сезон значение коэффициента корреляции 0.60 превышает значения для каждого месяца в отдельности, кроме ноября, поскольку случайные флуктуации осредняются и вклад отклика на Эль-Ниньо становится более значимым. Временные ряды наблюдаемого и модельного индекса PNA приведены на рис. 2.

С целью проверки статистической значимости полученных средних

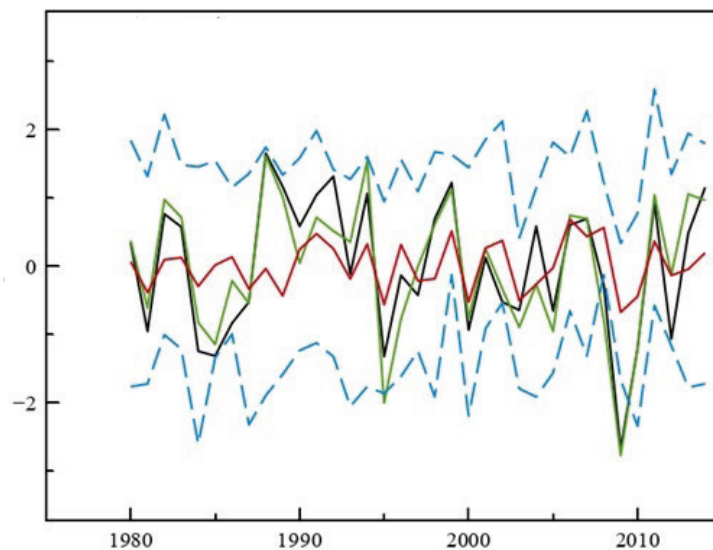


Рис. 1. Индекс NAO в декабре–феврале 1980–2014 гг. по данным реанализа ERA-Interim (черный), CRU (зеленый), среднего по модельному ансамблю (красный). Диапазон значений внутри модельного ансамбля показан голубыми штриховыми линиями.

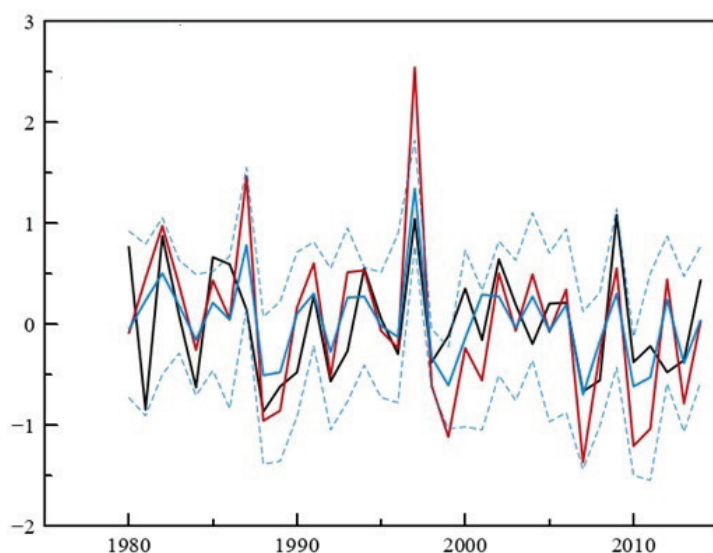


Рис. 2. Индекс PNA в декабре–феврале 1980–2014 гг. по данным реанализа ERA-Interim (черный), CRU (зеленый), среднего по модельному ансамблю (красный). Диапазон значений внутри модельного ансамбля показан голубыми штриховыми линиями.

за зимний сезон значений коэффициентов корреляции вычислено значение статистического t -критерия Стьюдента. Для индекса NAO $t=4.234$, для индекса PNA $t=4.309$, а для проекции аномалии среднемесячной температуры воздуха на первую ЭОФ реанализа $t=3.052$. Критические значения при уровне значимости $\alpha=0.05$ равны $t_{cr} = 2.101$ для выборки из 20 лет (для индекса NAO) и $t_{cr} = 2.035$ для выборки из 35 лет (для индекса PNA и проекции стратосферной аномалии среднемесячной температуры воздуха на первую ЭОФ реанализа). Поскольку значения t -критерия получились во всех случаях больше t_{cr} , то значения коэффициентов корреляции нельзя отнести к случайным величинам с вероятностью не менее 95%.

Значение коэффициента корреляции индекса NAO для климатической модели ИВМ и реанализа ERA-Interim принадлежит доверительному интервалу (0.385; 0.875) с 95%-й вероятностью. Значение коэффициента корреляции проекции аномалии среднемесячной температуры воздуха на первую ЭОФ реанализа для климатической модели ИВМ и реанализа ERA-Interim принадлежит доверительному интервалу (0.162; 0.694) с 95%-й вероятностью. Значение коэффициента корреляции среднего за зимний сезон индекса PNA для климатической модели ИВМ и реанализа ERA-Interim принадлежит доверительному интервалу (0.333; 0.777) с 95%-й вероятностью.

Воспроизведение аномалий погоды в июне–августе

Аналогичные расчеты были выполнены для воспроизведения аномалий погоды в июне–августе 1980–2014 гг. Использовались начальные состояния за 1 мая соответствующих лет. Коэффициенты корреляции аномалий по времени за июнь–август 1993–2009 гг., по данным различных прогностических систем и мультимодельного ансамбля (данные [9]) по территории России (25° в.д. – 170° з.д., 40° с.ш. – 80° с.ш.), представленные в табл. 1, показывают результаты для модели ИВМ РАН, в целом соответствующие международному уровню, но во всех случаях более низкие, чем для мультимодельного ансамбля. Данный результат является ожидаемым, поскольку прогноз мультимодельных ансамблей, как правило, превосходит по качеству прогноз лучшей прогностической системы, входящей в ансамбль [10–12].

Предположим, что x_{ijn} и f_{ijn} – временные ряды наблюдений и непрерывных детерминированных прогнозов для данных с долготой $i=1, \dots, I$, широтой $j=1, \dots, J$ в момент времени $n=1, \dots, N$. Введем средний квадрат ошибки прогноза $MSE_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_{ijn} - x_{ijn})^2$, а также средний квадрат ошибки «климатологического» прогноза

$$MSE_{cij} = \left(\frac{N}{N-1} \right)^2 \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{ij} - \bar{x}_j)^2.$$

Таблица 1. Осредненные по территории Северной Евразии (25° в.д. – 170° з.д., 40° с.ш. – 80° с.ш.) коэффициенты корреляции аномалий для приземной температуры T_{2m} , температуры при 850 гПа T_{850} , геопотенциала изобарической поверхности 500 гПа H_{500} и давления на уровне моря SLP по данным Европейского центра прогнозов погоды (ECMWF), французской метеослужбы (Meteo-France), метеослужбы США (GFS), метеослужбы Великобритании (Met Office), мультимодельного ансамбля ВМО (MME) [9] и модели климата ИВМ РАН (INMCM50)

Параметр	ECMWF	Meteo-France	GFS	Met Office	MME	INMCM50
T_{2m}	0.28	0.24	0.20	0.28	0.30	0.19
T_{850}	0.33	0.24	0.24	0.35	0.38	0.23
H_{500}	0.29	0.19	0.18	0.30	0.32	0.18
SLP	0.23	0.21	0.24	0.21	0.28	0.23

Тогда для каждой точки сетки показатель мастерства прогноза по сравнению с климатом равен

$$MSSS_j = 1 - \frac{MSE_{ij}}{MSE_{cij}}.$$

Если θ_j – угол широты j , то показатель мастерства прогноза по сравнению с климатом $MSSS$ в целом по региону:

$$MSSS = 1 - \frac{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I MSE_{ij} \cdot \cos(\theta_j)}{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I MSE_{cij} \cdot \cos(\theta_j)}.$$

Чем ближе к единице значение показателя мастерства прогноза по сравнению с климатом, тем выше качество прогноза. Отрицательные значения показателя говорят о том, что качество «климатологического» прогноза превосходит в данной точке сетки/регионе качество прогноза модели. Из табл. 2 видно, что значения показателя $MSSS$, вычисленные по территории всего земного шара, удовлетворяют уровню ведущих прогностических систем. Причем расположение областей наилучшей и наихудшей предсказуемости по критерию показателя $MSSS$ хорошо согласуется для данных модельных экспериментов и данных мультимодельного ансамбля.

Хотя в целом в умеренных широтах Северного полушария показатели качества воспроизведения сезонных аномалий погоды уступают аналогичным показателям для тропических широт, некоторые наиболее существенные экстремальные погодно-климатические события неплохо воспроизводятся моделью климата ИВМ РАН. Например, волна тепла летом 2003 г. в западной Европе, очень сухое лето на Ев-

Таблица 2. Значения показателя мастерства прогноза по сравнению с климатом MSSS для средних за июнь–июль–август полей приземной температуры воздуха T_{2m} , температуры воздуха на уровне 850 гПа T_{850} , геопотенциала изобарической поверхности 500 гПа H_{500} , давления на уровне моря SLP , осадков $Precip$, вычисленные по территории всего земного шара по данным Европейского центра прогнозов погоды (ECMWF), немецкой метеослужбы (DWD), французской метеослужбы (Meteo-France), метеослужбы США (GFS), метеослужбы Великобритании (Met Office), мультимодельного ансамбля ВМО (MME) [9] и модели климата ИВМ РАН (INMCM50)

Параметр	ECMWF	DWD	Meteo-France	GFS	Met Office	MME	INMCM50
T_{2m}	0.008	-0.020	-0.041	-0.119	0.013	0.085	-0.009
T_{850}	0.028	0.050	0.043	-0.029	0.104	0.092	0.108
H_{500}	-0.042	0.081	0.037	0.007	0.098	0.051	0.103
SLP	-0.028	0.072	0.050	0.031	0.095	0.046	0.091
$Precip$	0.126	-0.189	-0.047	-0.216	-0.016	0.195	-0.203

ропейской территории России (ЕТР) в 2002 г., рекордно большие осадки в бассейне Амура в 2013 г. Но некоторые подобные события, например, экстремально жаркое лето 2010 г. на ЕТР, не получаются в модели. Такие события, по-видимому, являются следствием только флуктуаций динамики атмосферы и не обусловлены начальным состоянием климатической системы.

Оперативное использование прогностической системы

Полученная технология моделирования сезонных аномалий погоды была применена и для оперативного прогнозирования аномалий декабря–февраля 2021–2022 гг. и июня–августа 2022 г., для чего использовались начальные условия для 1 ноября 2021 г. и 1 мая 2022 г. Вместо океанского анализа SODA3.4.2, который не доступен оперативно, использовался анализ Гидрометцентра России [13].

Были вычислены оценки прогнозов сезонных аномалий для летнего сезона 2022 г. по метрикам качества, используемым в стандартизированной системе верификации долгосрочных метеорологических прогнозов [14]. В качестве данных наблюдений использовались данные реанализа ERA5 [15]. Оценка результатов производилась согласно стандартизированной системе верификации долгосрочных метеорологических прогнозов на сетке $2.5 \times 2.5^\circ$, на которую данные модели и реанализа были предварительно интерполированы. Поскольку оценки

качества прогноза сезонных аномалий сравниваются с результатами ансамбля WMO LRF MME, то базовый период для расчета аномалий выбран таким же, как и для него, а именно 1993–2009 гг.

Наблюдавшиеся и модельные аномалии температуры приземного воздуха и давления на уровне моря представлены на рис. 3 и 4.

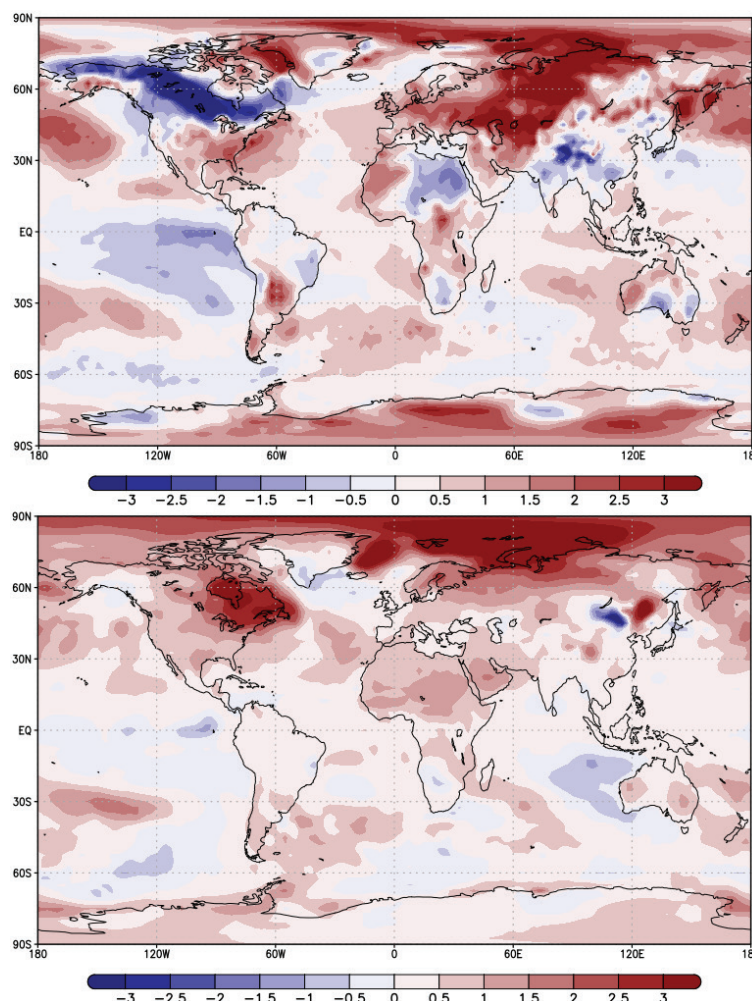


Рис. 3. Аномалия температуры приземного воздуха (K) в июне–августе 2022 г. относительно среднего за 1993–2009 гг. по данным реанализа ERA5 (вверху) и модельного ансамбля (внизу).

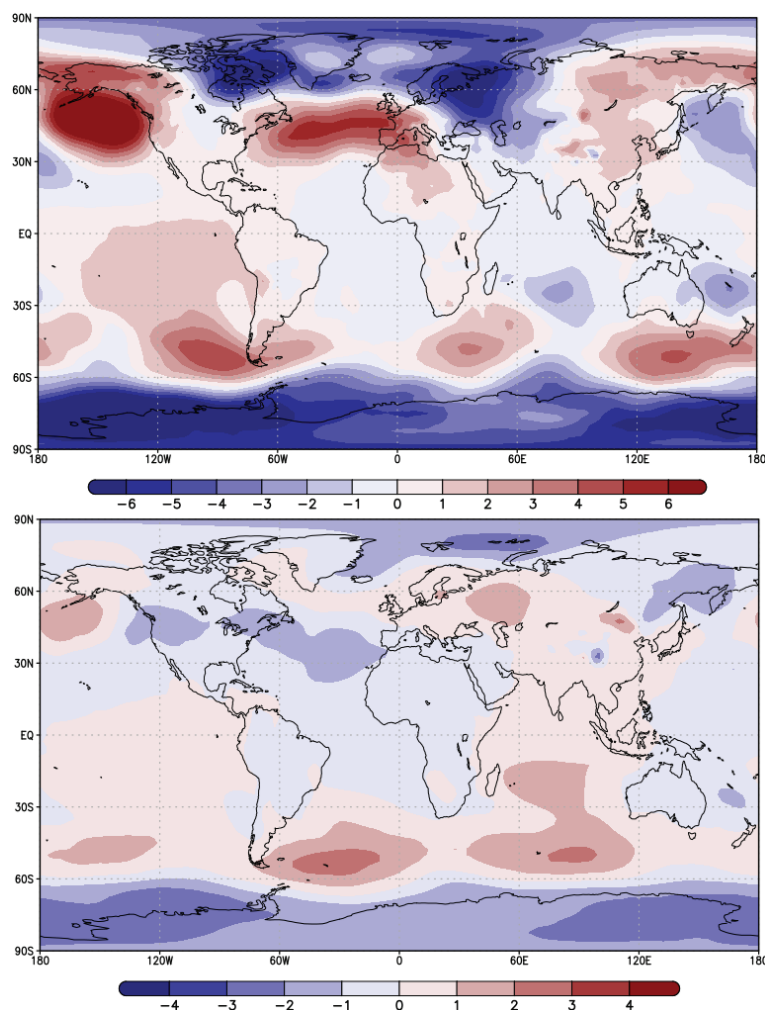


Рис. 4. Аномалия давления на уровне моря (гПа) в июне–августе 2022 г. относительно среднего за 1993–2009 гг. по данным реанализа ERA5 (вверху) и модельного ансамбля (внизу).

Модель отображает наличие продолжающегося явления Ла-Нинья, которое также наблюдается и по данным реанализа ERA5. В акватории северной части Тихого океана ожидалось значительные отклонения темпера-

турного режима от климата, связанные с продолжающейся отрицательной фазой ТДК. Это воспроизводится моделью и присутствует в данных аномалий реанализа ERA5. На большей части территории Северной Евразии летний сезон 2022 г. ожидался теплее обычного. Наиболее вероятны положительные аномалии температуры воздуха на юге Европейской России, в Центральной Азии и в Сибири. Указанные особенности присутствуют также и в прогнозе модели INMCM50 и данных реанализа ERA5 за исключением того, что по данным реанализа в летний сезон 2022 г. в Сибири наблюдались отрицательные аномалии приземной температуры.

Ключевые особенности реанализа аномалий давления на уровне моря воспроизводятся моделью, кроме положительных аномалий данного поля к северу от Гренландии, в Северной Атлантике и Северной Европе по данным реанализа ERA5.

Коэффициенты корреляции аномалий по пространству как для поля температуры на уровне 2 метра ($T2m$), так и для поля давления на уровне моря (SLP) имеют наибольшие значения в тропиках (табл. 3). Следует отметить высокие значения коэффициентов корреляции аномалий по пространству давления на уровне моря в тропиках и в Южном полушарии. Глобально по всему земному шару значение коэффициентов корреляции аномалий по пространству находится

Таблица 3. Коэффициенты корреляции аномалий по пространству температуры на уровне 2 м ($T2m$) и давления на уровне моря (SLP) по данным сезонного прогноза модели INMCM50, мульти-модельного ансамбля ВМО (справа от косой черты) и диапазона значений по данным отдельных моделей, входящих в мультимодельный ансамбль ВМО (диапазон значений указан в круглых скобках) [9], за июнь–июль–август 2022 г.

АСС	Глобально	Тропики 20° ю.ш. – 20° с.ш.	Внетропическая зона Северного полушария 20° с.ш. – 90° с.ш.	Внетропическая зона Южного полушария 90° ю.ш. – 20° ю.ш.	Северная Евразия 35° с.ш. – 75° с.ш. 20° в.д. – 180° в.д.
$T2m$	0.49/0.40 (0.10–0.50)	0.61	0.26	0.48	-0.07
SLP	0.64/0.63 (0.10–0.68)	0.87	0.03	0.80	-0.43

Таблица 4. Среднеквадратичная ошибка прогноза температуры на уровне 2 м (T_{2m}) и давления на уровне моря (SLP) по данным сезонного прогноза модели INMCM50, мультимодельного ансамбля ВМО и диапазона значений по данным отдельных моделей, входящих в мультимодельный ансамбль ВМО (диапазон значений указан в круглых скобках) [9], за июнь–июль–август 2022 г.

RMSE	Глобально	
	T_{2m}	SLP
INMCM50	0.85	144.71
WMO LRF MME	1.1 (1.05–1.45)	150 (140–200)

Таблица 5. Оправдываемость (%) сезонного прогноза модели INMCM50 температуры на уровне 2 м (T_{2m}) и давления на уровне моря (SLP) за июнь–июль–август 2022г., вычисленная на основе данных реанализа ERA5

Поле	Глобально	Тропики 20° ю.ш. – 20° с.ш.	Внетропическая зона Северного полушария 20° с.ш. – 90° с.ш.	Внетропическая зона Южного полушария 90° ю.ш. – 20° ю.ш.	Северная Евразия 35° с.ш. – 75° с.ш. 20° в.д. – 180° в.д.
T_{2m}	68	66	68	68	79
SLP	51	55	43	56	44

Таблица 6. ROC-характеристика температуры на уровне 2 м (T_{2m}) и давления на уровне моря (SLP) для категорий ниже нормы (BN), около нормы (NN), выше нормы (AN) по данным сезонного прогноза модели INMCM50 и мультимодельного ансамбля ВМО [9] за июнь–июль–август 2022 г.

ROC	Глобально						Северная Евразия					
	T_{2m}			SLP			T_{2m}			SLP		
	BN	NN	AN	BN	NN	AN	BN	NN	AN	BN	AN	NN
INMCM50	0.75	0.57	0.53	0.59	0.46	0.86	0.43	0.41	0.43	0.32	0.65	0.31
WMO LRF MME	0.72	0.64	0.75	0.75	0.59	0.77	0.21	0.26	0.12	0.54	0.48	0.53

на уровне моделей, демонстрирующих наиболее высокое качество прогноза на лето 2022 г. в мультимодельном ансамбле WMO LRF MME.

Среднеквадратичная ошибка прогноза модели INMCM50 средней за июнь–июль–август 2022 г. температуры на уровне 2 м (T_{2m}) ниже, чем по данным модели, демонстрирующей наиболее низкую среднеквадратичную ошибку в прогнозе мультимодельного ансамбля WMO LRF MME, а среднеквадратичная ошибка прогноза давления на уровне моря (SLP) модели ИВМ РАН ниже, чем по данным мультимодельного ансамбля WMO LRF MME (табл. 4).

Оправдываемость прогноза модели INMCM50 в среднем за июнь–июль–август 2022 г. была вычислена по фор-

муле из Приложения 1 в [16] (табл. 5). Оправдываемость сезонного прогноза модели INMCM50 в Северной Евразии достигает значения 79%.

Также в прогнозе за июнь–июль–август 2022 г. модель демонстрирует (табл. 6) значение площади под графиком кривой ROC большее, чем мультимодельный ансамбль WMO LRF MME для приземной температуры в Северной Евразии для всех трех категорий (ниже нормы, около нормы и выше нормы).

Заключение

На основе модели климата INMCM50 создана система прогнозирования сезонных аномалий погоды. Сравнение качества воспроизведения аномалий декабря–февраля и июня–августа с другими прогностическими системами показывает, что в основном оно соответствует современному мировому уровню и созданная прогностическая система готова к оперативному использованию.

Литература

1. B. Hoskins
Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 2013, **139**, 573. DOI: 10.1002/qj.1991.
2. M.A. Tolstykh, E.M. Volodin, S.V. Kostykin, R.Y. Fadeev, V.V. Shashkin, N.N. Bogoslovskii, R. M. Vilfand, D.B. Kiktev, T.V. Krasjuk, V.G. Mizyak, A.V. Shlyayeva, J.-F. Geleyn, I.N. Ezau, A.Y. Yurova
Russ. Meteorol. Hydrol., 2015, **40**(6), 374.
DOI: 10.3103/S1068373915060035.
3. E.M. Volodin, E.V. Mortikov, S.V. Kostykin, V.Ya. Galin, V.N. Lykossov, A.S. Gritsun, N.A. Diansky, A.V. Gusev, N.G. Yakovlev
Clim. Dyn., 2017, **49**, 3715. DOI: 10.1007/s00382-017-3539-7.
4. J.A. Carton, G.A. Chepurin, L. Chen
J. Climate, 2018, **31**(17), 6967. DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0149.1.
5. D.P. Dee, S.M. Uppala, A.J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M.A. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, P. Bechtold, A.C.M. Beljaars, L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, C. Delsol et al.
Quart. J. Roy. Met. Soc., 2011, **137**, 553. DOI: 10.1002/qj.828.
6. R.F. Adler, G.J. Huffman, A. Chang, R. Ferraro, P. Xie, J. Janowiak, B. Rudolf, U. Schneider, S. Curtis, D. Bolvin, A. Gruber, J. Susskind, P. Arkin
J. Hydrometeorol., 2003, **4**, 1147.
DOI: 10.1175/1525-7541(2003)004<1147:TVGPCP>2.0.CO;2.
7. N. Calvo, R.R. Garcia, W.J. Randel, D.R. Marsh
J. Atmos. Sci., 2010, **67**(7), 2331. DOI: 10.1175/2010JAS3433.1.
8. V.V. Vorobyeva, E.M. Volodin
Russ. Meteorol. Hydrol., 2018, **43**(11), 737.
DOI: 10.3103/S1068373918110043.
9. WMO Lead Centre for Long-Range Forecast Multi-Model Ensemble.
(<https://wmo.org>).
10. R. Hagedorn, F.J. Doblas-Reyes, T.N. Palmer
Tellus A, 2005, **57**, 219.
DOI: 10.1111/j.1600-0870.2005.00103.x.
11. A. Weigel, M.A. Liniger, C. Appenzeller
Quart. J. Royal. Meteorol. Soc., 2008, **134**, 241.
DOI: 10.1002/qj.210.
12. L. Batte, M. Deque
Tellus A, 2011, **63**, 283.
DOI: 10.1111/j.1600-0870.2010.00493.x.
13. V.N. Stepanov, Yu.D. Resnyanskii, B.S. Strukov, A.A. Zelenko
Russ. Meteorol. Hydrol., 2019, **1**, 50.
DOI: 10.3103/S1068373919010047.
14. Manual on the Global Data-Processing and Forecasting System. Attachment II.8: Standardised Verification System (SVS) for Long-Range Forecasts (LRF). Executive Summary. (<https://www.metoffice.gov.uk/binaries/content/assets/metofficegovuk/pdf/research/climate-science/climate-observations-projections-and-impacts/svslrf.pdf>).
15. H. Hersbach, B. Bell, P. Berrisford, S. Hirahara, S. Hirahara, A. Horányi, J. Muñoz-Sabater, J. Nicolas, C. Peubey, R. Radu, D. Schepers, A. Simmons, C. Soci, S. Abdalla, X. Abellan, G. Balsamo et al.
Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 2020, **146**, 1999. DOI: 10.1002/qj.3803.
16. Двадцать третья сессия Северо-Евразийского климатического форума (СЕАКОФ-23): Итоговое консенсусное решение (РФ, Москва, 29-30 ноября, 2022). (http://seakc-old.meteoinfo.ru/images/seakc/neacof23/neacof23_consensus.pdf).

English

Study of Weather and Climate Predictability at Seasonal Time Scales with Climate Model of INM RAS*

Evgeny M. Volodin

Marchuk Institute of Numerical
Mathematics, RAS
8 Gubkina Str.,
Moscow, 119333, Russia
volodinev@gmail.com

Vasilisa V. Vorobyeva

Marchuk Institute of Numerical
Mathematics, RAS
8 Gubkina Str.,
Moscow, 119333, Russia
VVorobyeva@yandex.ru

Maria A. Tarasevich

Marchuk Institute of Numerical
Mathematics, RAS
8 Gubkina Str.,
Moscow, 119333, Russia
mashatarasevich@gmail.com

Abstract

Prediction system of seasonal weather and climate anomalies is developed on the basis of INM RAS climate model. The model includes block of atmospheric dynamics with surface and soil model, block of ocean and sea ice dynamics, and aerosol block. Initial states were generated as anomalies of atmospheric, oceanic and ice states derived from reanalysis added to model climatology. Simulation of weather anomalies in December–February and June–August, 1980–2014 was considered. It is shown that model is capable to reproduce anomalies of winter and summer seasons, including anomalies associated with North Atlantic Oscillation (NAO), Pacific North American Oscillation (PNA). The quality of seasonal forecasts with developed prediction system is close to the quality of other present day seasonal prediction systems. Operative simulations of weather anomalies in June–August, 2022, are considered. It is possible to use successfully the prediction system in operative regime.

Keywords: model, climate, weather, anomaly, atmosphere, ocean, correlation, prediction.

*The work was financially supported by RFBR (project 20-05-00673).

Images & Tables

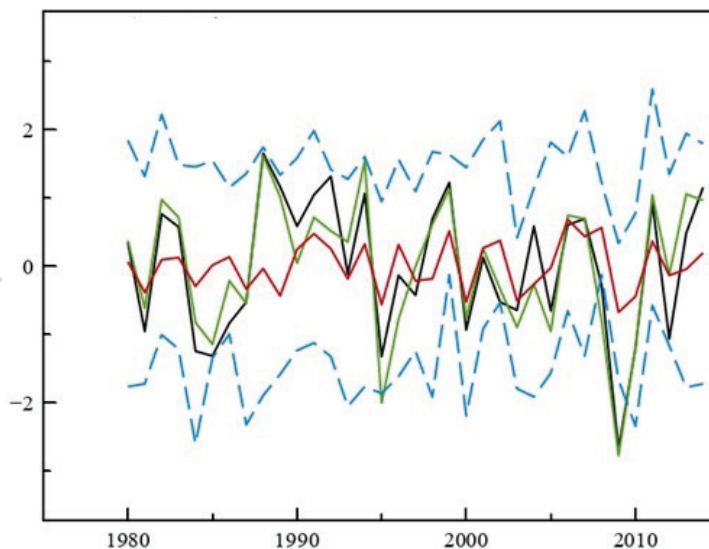


Fig. 1. NAO index in December–February 1980–2014 for ERA-Interim reanalysis (black), CRU (green), mean over model ensemble (red). Interval for model ensemble members is shown in blue dashed.

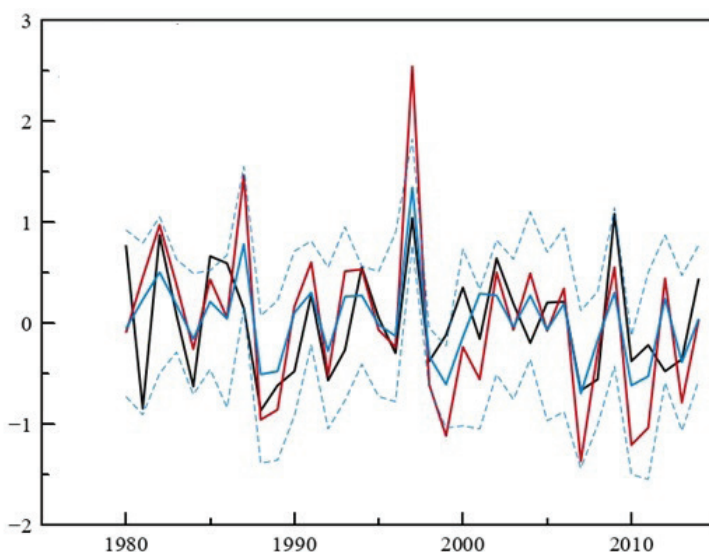


Fig. 2. PNA index in December–February 1980–2014 for ERA-Interim reanalysis (black), CRU (green), mean over model ensemble (red). Interval for model ensemble members is shown in blue dashed.

Table 1. Correlation coefficients averaged over Northern Eurasia (25E–170W, 40N–80N) for near surface air temperature (T2m), temperature at 850 hPa (T850), height of 500 hPa (H500) and sea level pressure (SLP) for prediction systems of European Center of Medium Weather Forecasts (ECMWF), Meteo-France, USA prediction system (GFS), UK Met Office (Met Office), multimodel ensemble WMO LRF MME (MME) [9] and climate model of INM RAS (INMCM50)

Parameter	ECMWF	Meteo-France	GFS	Met Office	MME	INMCM50
T2m	0.28	0.24	0.20	0.28	0.30	0.19
T850	0.33	0.24	0.24	0.35	0.38	0.23
H500	0.29	0.19	0.18	0.30	0.32	0.18
SLP	0.23	0.21	0.24	0.21	0.28	0.23

Table 2. Values of prediction skill indicator with respect to climate MSSS for July–August mean near surface air temperature (T_{2m}), temperature at 850 hPa (T_{850}), height of 500 hPa (H_{500}), sea level pressure (SLP), precipitation (Precip) for the globe calculated for prediction systems of European Center of Medium Weather Forecasts (ECMWF), Meteo-France, USA prediction system (GFS), UK Met Office (Met Office), multimodel ensemble WMO LRF MME (MME) [9] and climate model of INM RAS (INMCM50)

Parameter	ECMWF	DWD	Meteo-France	GFS	Met Office	MME	INMCM50
T_{2m}	0.008	-0.020	-0.041	-0.119	0.013	0.085	-0.009
T_{850}	0.028	0.050	0.043	-0.029	0.104	0.092	0.108
H_{500}	-0.042	0.081	0.037	0.007	0.098	0.051	0.103
SLP	-0.028	0.072	0.050	0.031	0.095	0.046	0.091
Precip	0.126	-0.189	-0.047	-0.216	-0.016	0.195	-0.203

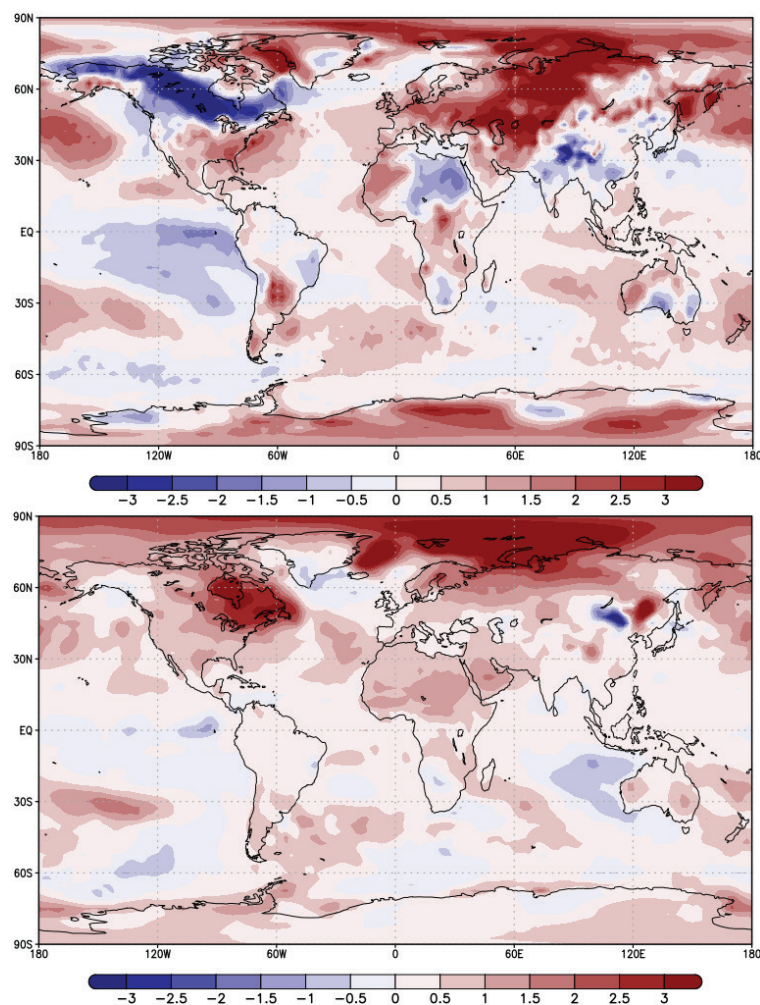


Fig. 3. Surface temperature anomaly (K) in June–August 2022 with respect to 1993–2009 mean for reanalysis ERA5 (top) and model ensemble (bottom).

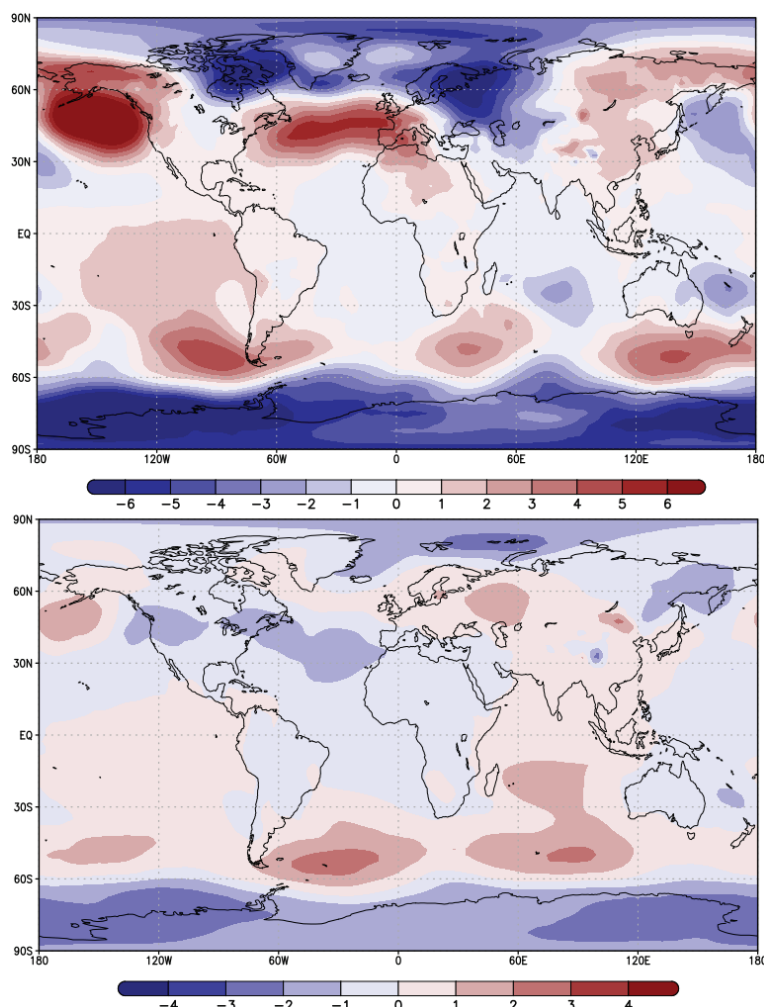


Fig. 4. Sea level pressure anomaly (hPa) in June–August 2022 with respect to 1993–2009 mean for reanalysis ERA5 (top) and model ensemble (bottom).

Table 3. Spatial anomaly correlation coefficients for temperature at 2 m (T2m) and sea level pressure (SLP) for seasonal forecast of model INMCM50/Multimodel ensemble WMO LRF MME [9] and interval for individual models for June–August 2022

ACC	Global	Tropics 20S–20N	Northern extratropics 20N–90N	Southern extratropics 90S–20S	Northern Eurasia 20E–180E, 35N–75N
T2m	0.49/0.40 (0.10–0.50)	0.61	0.26	0.48	-0.07
SLP	0.64/0.63 (0.10–0.68)	0.87	0.03	0.80	-0.43

Table 4. Root mean square error for global forecast for temperature at 2 m (T2m) and sea level pressure (SLP) for model INMCM50, multimodel ensemble WMO LRF MME [9] and interval for individual models in brackets for June–August 2022

RMSE	Global	
	T2m	SLP
INMCM50	0.85	144.71
WMO LRF MME	1.1 (1.05–1.45)	150 (140–200)

Table 5. Forecast skill (%) for model INMCM50 for temperature at 2 m (T2m) and sea level pressure (SLP) for June–August 2022 with respect to reanalysis ERA5

Variable	Global	Tropics 20S–20N	Northern extratropics 20N–90N	Southern extratropics 90S–20S	Northern Eurasia 20E–180E, 35N–75N
T2m	68	66	68	68	79
SLP	51	55	43	56	44

Table 6. ROC-values for temperature at 2 m (T2m), sea level pressure (SLP) for category below norm BN, near norm NN and above norm AN for seasonal forecast with INMCM50 model and for multimodel ensemble WMO LRF MME [9] for June–August 2022

ROC	Global						Northern Eurasia					
	T2m			SLP			T2m			SLP		
	BN	NN	AN	BN	NN	AN	BN	NN	AN	BN	AN	NN
INMCM50	0.75	0.57	0.53	0.59	0.46	0.86	0.43	0.41	0.43	0.32	0.65	0.31
WMO LRF MME	0.72	0.64	0.75	0.75	0.59	0.77	0.21	0.26	0.12	0.54	0.48	0.53

References

1. B. Hoskins
Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 2013, **139**, 573. DOI: 10.1002/qj.1991.
2. M.A. Tolstykh, E.M. Volodin, S.V. Kostykin, R.Y. Fadeev, V.V. Shashkin, N.N. Bogoslovskii, R. M. Vilfand, D.B. Kiktev, T.V. Krasjuk, V.G. Mizyak, A.V. Shlyayeva, J.-F. Geleyn, I.N. Ezau, A.Y. Yurova
Russ. Meteorol. Hydrol., 2015, **40**(6), 374.
DOI: 10.3103/S1068373915060035.
3. E.M. Volodin, E.V. Mortikov, S.V. Kostykin, V.Ya. Galin, V.N. Lykossov, A.S. Gritsun, N.A. Diansky, A.V. Gusev, N.G. Yakovlev
Clim. Dyn., 2017, **49**, 3715. DOI: 10.1007/s00382-017-3539-7.
4. J.A. Carton, G.A. Chepurin, L. Chen
J. Climate, 2018, **31**(17), 6967. DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0149.1.
5. D.P. Dee, S.M. Uppalaa, A.J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M.A. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, P. Bechtold, A.C.M. Beljaars, L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, C. Delsol et al.
Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 2011, **137**, 553. DOI: 10.1002/qj.828.
6. R.F. Adler, G.J. Huffman, A. Chang, R. Ferraro, P. Xie, J. Janowiak, B. Rudolf, U. Schneider, S. Curtis, D. Bolvin, A. Gruber, J. Susskind, P. Arkin
J. Hydrometeorol., 2003, **4**, 1147.
DOI: 10.1175/1525-7541(2003)004<1147:TVGPCP>2.0.CO;2.
7. N. Calvo, R.R. Garcia, W.J. Randel, D.R. Marsh
J. Atmos. Sci., 2010, **67**(7), 2331. DOI: 10.1175/2010JAS3433.1.
8. V.V. Vorobyeva, E.M. Volodin
Russ. Meteorol. Hydrol., 2018, **43**(11), 737.
DOI: 10.3103/S1068373918110043.
9. WMO Lead Centre for Long-Range Forecast Multi-Model Ensemble.
(<https://wmo.org>).
10. R. Hagedorn, F.J. Doblas-Reyes, T.N. Palmer
Tellus A, 2005, **57**, 219.
DOI: 10.1111/j.1600-0870.2005.00103.x.
11. A. Weigel, M.A. Liniger, C. Appenzeller
Quart. J. Royal. Meteorol. Soc., 2008, **134**, 241.
DOI: 10.1002/qj.210.
12. L. Batte, M. Deque
Tellus A, 2011, **63**, 283.
DOI: 10.1111/j.1600-0870.2010.00493.x.
13. V.N. Stepanov, Yu.D. Resnyanskii, B.S. Strukov, A.A. Zelenko
Russ. Meteorol. Hydrol., 2019, **1**, 50.
DOI: 10.3103/S1068373919010047.
14. Manual on the Global Data-Processing and Forecasting System. Attachment II.8: Standardised Verification System (SVS) for Long-Range Forecasts (LRF). Executive Summary. (<https://www.metoffice.gov.uk/binaries/content/assets/metofficegovuk/pdf/research/climate-science/climate-observations-projections-and-impacts/svslrf.pdf>).
15. H. Hersbach, B. Bell, P. Berrisford, S. Hirahara, S. Hirahara, A. Horányi, J. Muñoz-Sabater, J. Nicolas, C. Peubey, R. Radu, D. Schepers, A. Simmons, C. Soci, S. Abdalla, X. Abellan, G. Balsamo et al.
Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 2020, **146**, 1999. DOI: 10.1002/qj.3803.
16. Twenty-third Session of the North Eurasian Climate Forum (SEACOF-23): Final Consensus Decision (RF, Moscow, November 29–30, 2022) (in Russian). (http://seakc-old.meteoinfo.ru/images/seakc/neacof23/neacof23_consensus.pdf).