

УДК 53.01

Региональная модель динамики атмосферы для системы численного моделирования климата Арктики

**К.Г. Рубинштейн¹, Г.А. Зароченцев¹, Р.Ю. Игнатов², В.И. Бычкова³,
Е.М. Володин^{4,5}, Н.Г. Яковлев^{2,4}, А.С. Грицун⁴**

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

²Институт проблем безопасного развития атомной
энергетики РАН, г. Москва, Россия;

³Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва, Россия;

⁴Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука, г. Москва, Россия;

⁵Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия
prognozist@gmail.com

В статье приводятся первые результаты согласования региональной модели WRF-ARW глобальной климатической моделью ИВМ РАН для воспроизведения арктического климата. Проведено сравнение результатов двух экспериментов с различными параметризациями физических процессов в региональной модели с данными измерений в регионе и Арктическим реанализом. Показано, что результаты, полученные в региональной модели, в ряде случаев ближе к наблюдениям.

Ключевые слова: моделирование климата Арктики, региональная модель, глобальная климатическая модель, численные эксперименты

Regional model of atmospheric dynamics for the system of numerical modeling of the Arctic climate

**K.G. Rubinshtein¹, G.A. Zarochencev¹, R.Yu. Ignatov², V.I. Bychkova³,
E.M. Volodin^{4,5}, N.G. Yakovlev^{2,4}, A.S. Gritsun⁴**

¹Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;

²The Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

³A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

⁴Marchuk Institute of Numerical Mathematics
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

⁵Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
prognozist@gmail.com

The first results of the harmonization of the WRF-ARW regional model with the INM RAS global climate model for simulating the Arctic climate are presented. The results of two experiments with different parametrizations of physical processes in the regional model are compared with measurement data in the region and with the Arctic reanalysis. It is shown that the results obtained in the regional model are closer to observations in some cases.

Keywords: Arctic climate modeling, regional model, global climate model, numerical experiments

Введение

Анализ расчетов по климатическим моделям ведущих мировых центров показывает, что начиная с 70-80 гг. XX века в Арктическом регионе происходит заметное потепление. Скорость роста приземной температуры в Арктике более чем вдвое превышает среднюю по Земле [15, 16].

Такие изменения температуры могут привести к заметному уменьшению площади морского льда до 35 % [8], деградации вечной мерзлоты, изменению биосферы.

Для России оценка вероятного состояния климатической системы в Арктике имеет первостепенное значение, прежде всего из-за растущей экономической значимости региона, а также для безопасного функционирования Северного морского пути.

Качество оценки вероятного состояния климатической системы зависит от адекватности задания внешних воздействий на климатическую систему и от внутренней способности климатических моделей правильно воспроизводить динамику климатической системы в Арктическом регионе.

Как правило, глобальные климатические модели, создаваемые для интегрирования на десятки лет, вынуждены иметь невысокое пространственное разрешение. Уже довольно давно возникла методика использования региональных климатических моделей, которые в качестве краевых и начальных условий используют глобальные модели, а для региона особого интереса включают региональную модель, с гораздо более детальным шагом.

Именно такую задачу предполагается начать решать в рамках данной работы.

В данной публикации приводятся результаты создания комплекса из региональной модели WRF-ARW [17] и глобальной климатической модели атмосферы и океана ИВМ РАН [20] для детального описания климата Арктики в дальнейшем и первым оценкам качества получаемых результатов за один год.

Количество публикаций по региональному исследованию изменений климата Арктического региона за рубежом растет в последнее время. Так как в России на эту тему публикаций крайне мало, приведем краткий обзор нескольких важных, на наш взгляд, работ.

Краткий обзор публикаций о региональных исследованиях климата Арктики

Начнем обзор с относительно недавней публикации [1]. В ней описываются результаты моделирования Арктического региона за 25 лет (1990–2014 гг.) с помощью региональной модели с относительно высоким разрешением RASM. Граничные и краевые условия брались из глобальной модели циркуляции атмосферы, океана и суши (системы Земли)

СТSM1. Было показано, что полученные с помощью региональной модели осадки ближе к осадкам в реанализах и спутниковым данным во всех бассейнах рек, входивших в область расчетов. Глубина снежного покрова, воспроизведенного региональной моделью, также близка к наблюдениям, прежде всего на Аляске. Показано также, что региональная модель лучше воспроизводит межгодовую изменчивость климата Арктики, чем глобальная модель.

Следующей работой, о которой стоит сказать в этом кратком обзоре, является публикация [18]. В ней приводятся результаты Канадской региональной климатической модели (CRCM5) для Арктического региона по данным глобальной климатической модели атмосферы – океана. В экспериментах было показано, что давление на уровне моря для всех сезонов моделировалось в региональной модели ближе к наблюдениям. Более проблематичным было воспроизведение приземной температуры и осадков, но и эти величины приблизились к наблюдениям.

Очень важным этапом для развития региональных исследований климата Арктики явилось создание в 2016 году первой версии Арктического реанализа [<http://doi.org/10.1002/qj.2527>].

В результатах Арктического реанализа содержатся метеорологические поля в узлах регулярных точек по Арктическому региону за 16 лет (2000–2015 гг.). Имеется две версии реанализа с пространственным разрешением в 30 и 15 км. Арктический реанализ создан с помощью усвоения всех видов доступных измерений полярной версией гидродинамической модели WRF-ARW (США) [17]. Ниже будут перечислены некоторые особенности полярной версии модели.

Десять трехмерных полей с параметрами в свободной атмосфере доступны на 29 сигма-поверхностях и 27 двумерных полей с параметрами приземной атмосферы. Поля приземного давления, температуры на 2 м и ветра на 10 м из Арктического реанализа с разрешением в 30 км используются в данной статье в качестве одного из эталонов. В качестве эталонов использовались также данные наблюдений на синоптических станциях в том же регионе (см. рис. 1 справа).

На рис. 1 справа приведены две карты синоптических станций, работающих в зоне расчетов региональной модели. Известно, что Арктическом регионе станций наблюдений совсем не много и расположены они в основном на берегах морей, в ряде регионов, например в Норвегии, сильно изрезанных глубокими заливами. Для некоторого анализа качества воспроизведения годового хода приземных метеорологических параметров атмосферы в различных регионах области эти станции разделены на пять регионов: Норвежский-1, Норвежский-2, Канадо-Гренландский и два Российских. Разделение на эти географические регионы, по нашему мнению, может способствовать в дальнейшем пониманию достоинств и недостатков описания физических процессов, характерных для этих регионов в моделях, в первую очередь в описании приземных теплового и влажностного балансов в различных регионах Арктики.

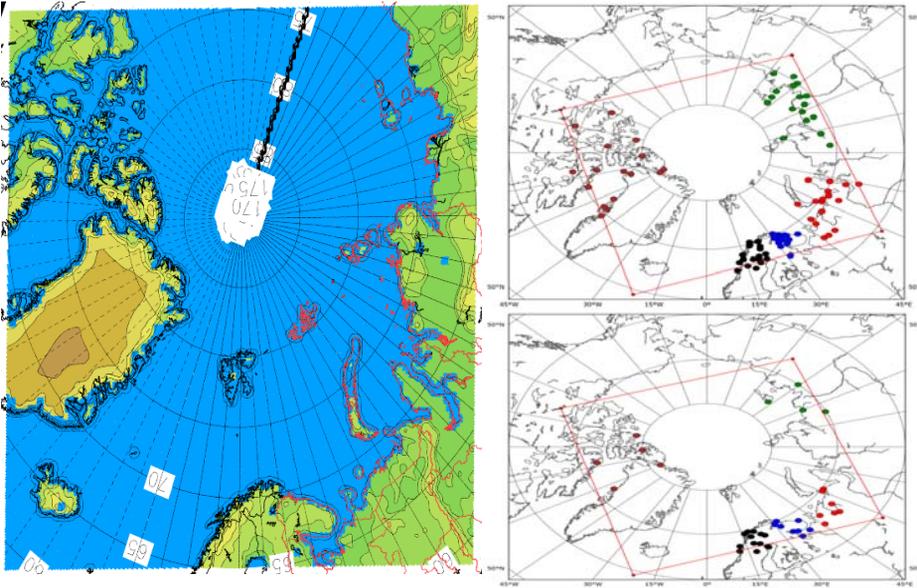


Рис. 1. Абсолютные высоты поверхности для области расчетов в полярной версии региональной модели WRF-ARW (слева). Группы из 17 случайных метеорологических станций в области расчетов по региональной модели WRF-ARW (справа сверху). Группы станций с учетом критерия ВМО отбора в области расчетов по региональной модели WRF-ARW (справа снизу). Каждому району на карте соответствует определенный цвет: Норвегия-1 – черный, Норвегия-2 – синий, Канада-Гренландия – коричневый, Россия-1 – красный, Россия-2 – зеленый.

Fig. 1. Absolute surface heights for the calculation area in the polar version of the regional model WRF-ARW (left). Groups of 17 random meteorological stations in the area of calculations for the regional model WRF-ARW (right-top). Groups of stations taking into account the WMO criterion for selection meteorological stations in the area of calculations for the regional model WRF-ARW (right-bottom). Each region on the map corresponds to a certain color: Norway-1 – black, Norway-2 – blue, Canada-Greenland – brown, Russia-1 – red, Russia-2 – green.

Мы провели анализ двумя способами: во-первых, по рекомендации рецензента, в каждом регионе были найдены станции наблюдений, соответствующие критериям ВМО по сравнению моделей, а именно – они отстояли от узлов сетки не более чем на 50 км, высота расположения станции отличается от модельной орографии менее чем на 300 м. Эти станции приведены на рис. 1 справа сверху. В связи с этим для разных регионов количество станций менялось от 5 до 12 (см. табл. 2 и 4). И вторым способом: в каждом регионе случайным образом выбрано по 17 станций (число 17 определено как максимально возможное для всех регионов). И в первом, и во втором случае по этим группам станций рассчитаны среднегодовые статистические характеристики сравнения годового хода модельных расчетов и наблюдений.

Подчеркнем, что на этом этапе работы нашей задачей являлось не количественное сравнение моделей, а лишь качественное понимание того, что может внести региональная негидростатическая модель с более высоким разрешением в моделирование климата Арктики на временных масштабах нескольких лет десятилетий.

Описание комплекса моделей и постановка экспериментов

В работе мы используем наиболее современную версию отечественной климатической модели [20] с использованием протоколов проекта CMIP6 [<https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip6>] и полярную региональную модель WRF-ARW (США) [14]. На дальнейших этапах работы предполагаем получить достоверные (ансамблевые) и детальные оценки климатических изменений в Арктике в первой половине XXI века.

На данном, первом этапе работы была подготовлена полярная версия модели WRF-ARW с шагом 30 км для области, приведенной на рис. 1. С нею проведен ряд численных экспериментов с начальными данными и краевыми условиями от глобальной климатической модели ИВМ РАН.

В экспериментах в WRF-ARW использовались параметризации, ссылки на которые даны в табл. 1.

Таблица 1. Схемы параметризаций физических процессов в численных экспериментах

Table 1. Schemes of parametrization of physical processes in numerical experiments

Параметризация	Эксперимент 1	Эксперимент 2
Микрофизика	WSM6 [10]	WDM6 [9]
Пограничный слой	MYJ TKE [11]	MYNN 2.5 [12]
Приземный слой	MV5 [17]	MYNN [6]
Конвекция	G-D [4]	K-F [7]
Длинноволновая радиация	RRTM [21]	RRTMG [5]
Коротковолновая радиация	Goddard [2]	RRTMG [5]
Процессы в почве	Noah-MP [13]	Noah [3]

Приведем также основные отличия полярной версии модели WRF-ARW от стандартной. Полярная версия WRF представляет собой набор модификаций, предназначенный для более качественного описания атмосферных процессов на территории, большей частью покрытой льдом и снегом, что в первую очередь соответствует Арктическому бассейну. Полярная версия модели WRF отличается от стандартной в основном описанием энергообмена с использованием модели NOAH LSM [8] над территориями, покрытыми морским и другими видами льда, с возможностью количественного описания ледяного покрова (сплоченность, толщина

льда и снега на льду). В полярной версии в том случае, если поверхность в значительной степени заснежена (более 97 %), используется значение теплопроводности для снега, а не для почвы. Для заснеженных регионов учитывается теплота сублимации, для бесснежных – теплота парообразования.

Для описания тепловых процессов в ледяном покрове используется четырехслойная модель морского льда для описания обмена теплом и влагой на границах снег – атмосфера и снег – морской лед. Кроме того, изменен ряд теплофизических характеристик подстилающей поверхности: альbedo, излучательная способность, теплопроводность, влажность поверхности в точках наземного и морского льда должны быть равными 1; доля снежного покрова не ограничена для всех поверхностей; альbedo морского льда составляет 0,8; излучательная способность льда – 0,98; теплопроводность надо льдом (водным и наземным) устанавливается в соответствии с теплопроводностью над снегом.

Для генерации граничных условий региональной модели был проведен численный эксперимент с глобальной моделью климата INM-CM48, где моделировались условия 30-ти лет с 1986 по 2015 г. Описание модели и воспроизведения современного климата приведено в [20]. Разрешение модели в атмосферном блоке составляет $2 \times 1,5$ градуса по долготе и широте соответственно и 21 вертикальная поверхность, в океанском блоке горизонтальное разрешение составило $1 \times 0,5$ градуса и 40 поверхностей по вертикали. Кроме блоков динамики атмосферы и динамики океана модель содержит еще аэрозольный блок.

Все воздействия на климатическую систему были заданы в соответствии с протоколом CMIP6 [<https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip6>], а именно в соответствии с имеющимися наблюдениями для 1986–2015 гг. были заданы концентрации углекислого газа, метана, закиси азота, озона, эмиссии антропогенных аэрозолей, концентрация вулканического стратосферного аэрозоля, солнечная постоянная и распределение солнечного излучения по спектру. Начальное состояние модельного климата, соответствующее началу 1986 г., было получено из аналогичного эксперимента с моделью для 1850–1985 гг., где все воздействия были заданы в соответствии с наблюдениями. Для получения начального состояния никак не использовалась информация о наблюдавшемся состоянии динамики атмосферы и океана в начале 1986 года.

Каждые 6 часов сохранялись модельные прогностические поля динамики атмосферы (давление на уровне моря, температура, удельная влажность, зональная и меридиональная составляющие скорости ветра), профили температуры и влажности почвы, температура поверхности, концентрация морского льда, количество накопленного снега, температура, удельная и относительная влажность на высоте 2 м, зональная и меридиональная компоненты скорости ветра на высоте 10 м.

Анализ результатов

Так как расчеты с региональной моделью были проведены только на один 2004 год, мы начали анализ результатов со сравнения воспроизведения региональной модели и глобальной среднегодовых величин годового хода приземного давления, приземной температуры и приземного ветра.

На рис. 2 приведены примеры годового хода среднемесячных величин приземного давления (верхний ряд), температуры на 2 м (средний ряд) и ветра на высоте 10 м (нижний ряд) на синоптических станциях, интерполированных на станции из данных Арктического реанализа, глобальной климатической модели и из результатов двух численных экспериментов с моделью WRF-ARW. Кроме того, на этом же рисунке приведена изменчивость годового хода каждого параметра.

На левом верхнем рисунке видно, что визуально ни одна модель, даже реанализ, не воспроизвели адекватно наблюдениям дату месячного минимума давления. Видно также, что давление в 2004 г. достигало абсолютного минимума за 10 лет. Наиболее близко к наблюдениям был воспроизведен для обеих станций годовой ход приземного давления в эксперименте ИВМ РАН, в Арктическом реанализе и в эксперименте 2 WRF. Для станции Аллаиховский Улус (Якутия) абсолютная ошибка составляет 4,62 гПа, для станции поселок Первомайский (Якутия) – 2,73 гПа, при этом у глобальной модели ошибка составляет 5,6 и 4,3 гПа соответственно, у Арктического реанализа – 2,9 и 1,4 гПа. Можно видеть также, что и климатическая модель, и эксперимент 2 региональной модели WRF лежат вблизи области изменчивости. Годовой ход давления для станции Первомайская лежит практически полностью в пределах изменчивости годового хода давления ближе к наблюдениям приблизительно в полтора раза, чем давление по модели ИВМ РАН.

Рассмотрим на рис. 2 средний ряд с годовым ходом приземной температуры для двух станций. Видим, что в целом годовой ход приземной температуры во всех экспериментах воспроизведен неплохо. Практически для всех экспериментов температура лежит в пределах изменчивости. Из экспериментов лучшие результаты в модели ИВМ РАН и в результатах модели WRF, эксперимент 2. Абсолютные ошибки в воспроизведении годового хода температуры с региональной моделью в эксперименте 2 также несколько меньше ошибок глобальной модели.

В нижнем ряду рисунка приведены годовые ходы среднемесячных величин модуля скорости ветра на 10 м. Показано, что разброс в воспроизведении скорости ветра значительно выше. Средние величины составляют от 1,5 до 4,8 м/с. Коэффициенты корреляции – от -0,5 до 0,7 у реанализа. Тем не менее абсолютные ошибки у региональной модели для обеих станций меньше, чем у глобальной модели. Так, для первой станции абсолютная ошибка составляет 1,19 м/с вместо 1,73 м/с, для второй – 0,6 м/с вместо 1,3 м/с.

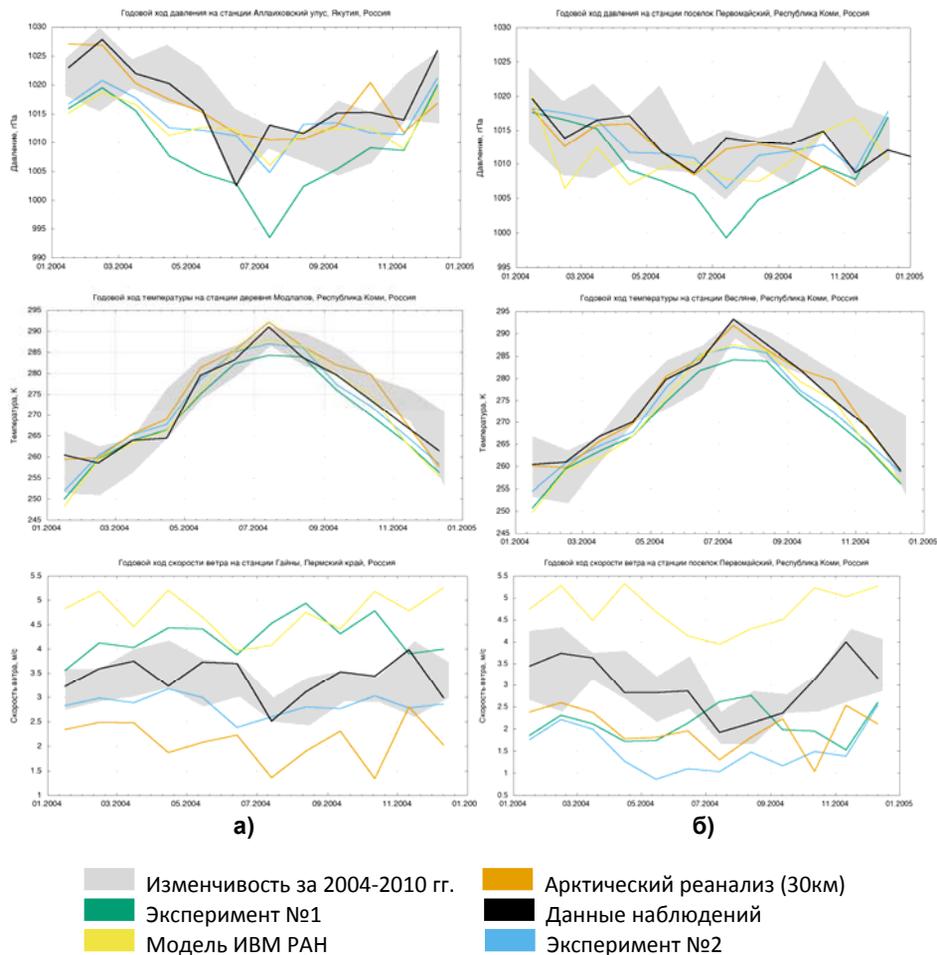


Рис. 2. Примеры годовых ходов давления (верхний ряд), температуры (средний ряд) и ветра (нижний ряд) для экспериментов 1 (а) и 2 (б) с полярной версией WRF-ARV.

Fig. 2. Examples of annual pressure passages (top row), temperatures (middle row) and wind (bottom row) for the first (a) and second (б) experiments with the polar version of the WRF-ARV, observational data and Arctic reanalysis.

Таким образом, судя по анализу годового хода основных характеристик приземной атмосферы и его межгодовой изменчивости, полярная версия региональной модели в конфигурации эксперимента 2 несколько улучшает годовой ход приземного давления, температуры и скорости ветра и приближает расчеты к наблюдениям и Арктическому реанализу. При этом надо подчеркнуть, что климатическая глобальная модель, как и региональная, не использует данных метеорологических наблюдений за 2004 год.

Две средние по каждой группе станций характеристики сравнения модельных значений и стационарных приведены в табл. 2 и 4 по станциям, соответствующим критериям ВМО, в табл. 3 и 5 – по 17 станциям в регионах. В табл. 2 и 3 приведены средние по станциям, проходящим по критериям ВМО, и по 17 станциям коэффициенты корреляции годовых ходов давления, температуры и скорости ветра модельных и стационарных величин, в табл. 4 и 5 – средние по тем же наборам станций относительные ошибки величин давления, температуры и скорости ветра.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции данных наблюдений и восстановления годового хода с учетом критериев ВМО отбора станций для сравнения моделей

Table 2. Correlation coefficients of the annual progress according to station observations for stations taking into account the WMO criteria and model results for different polar regions

	Норвегия №1 (12)			Норвегия №2 (8)			Канада- Гренландия (6)			Россия №1 (7)			Россия №2 (4)		
	P ₀	t ₂	W ₁₀	P ₀	t ₂	W ₁₀	P ₀	t ₂	W ₁₀	P ₀	t ₂	W ₁₀	P ₀	t ₂	W ₁₀
WRF V4	0.07	0.95	0.21	0.22	0.95	0.14	0.19	0.95	0.31	-0.14	0.94	-0.03	0.79	0.97	0.31
WRF V8	0.11	0.95	0.26	0.26	0.95	0.29	0.27	0.95	-0.06	-0.11	0.95	-0.04	0.67	0.97	0.14
IMN RAS	0.01	0.94	0.11	0.29	0.95	0.46	0.16	0.94	0.10	-0.09	0.95	0.15	0.73	0.98	-0.14
ASR 30km	0.37	0.99	0.43	0.89	0.99	0.79	0.80	0.1	0.64	0.96	0.99	0.42	0.84	1	0.42

Примечание. В скобках указано количество станций в выбранном регионе, соответствующих критериям ВМО для сравнения моделей.

Таблица 3. Коэффициенты корреляции данных наблюдений и восстановления годового хода по случайным 17 станциям в регионе

Table 3. Correlation coefficients of the annual variation according to station observations for 17 random stations and model results for individual polar regions

	Норвегия №1			Норвегия №2			Канада- Гренландия			Россия №1			Россия №2		
	P ₀	t ₂	W ₁₀	P ₀	t ₂	W ₁₀	P ₀	t ₂	W ₁₀	P ₀	t ₂	W ₁₀	P ₀	t ₂	W ₁₀
WRF V4	0.37	0.94	0.3	0.3	0.96	0.36	0.19	0.92	0.22	-0.13	0.83	0.04	0.72	0.96	0.28
WRF V8	0.41	0.94	0.3	0.28	0.96	0.42	0.24	0.93	0.19	-0.08	0.84	0.11	0.62	0.97	0.09
IMN RAS	0.27	0.92	-0.01	0.28	0.96	0.37	0.16	0.92	0.23	-0.09	0.84	0.38	0.63	0.97	-0.34
ASR 30km	0.76	0.99	0.65	0.91	0.99	0.75	0.79	0.97	0.73	0.71	0.94	0.59	0.82	1	0.55

Примечание. P₀ – давление на уровне моря, t₂ – температура на 2 м, W₁₀ – скорость ветра на 10 м. Желтым цветом обозначены наиболее высокие коэффициенты в экспериментах с моделями.

Из табл. 2 и 3 видно, что лучше всего воспроизводится годовой ход температуры, коэффициенты корреляции не ниже 0,6. Самые низкие коэффициенты для областей российских станций Россия. Хуже всего, естественно, во всех экспериментах воспроизводился годовой ход приземного ветра.

Таблица 4. Средняя годовая абсолютная ошибка восстановления годового хода с учетом критериев ВМО отбора станций для сравнения моделей
Table 4. Average annual absolute error in the restoration of the annual course, taking into account the WMO criteria for the selection of stations

	Норвегия №1 (12)			Норвегия №2 (8)			Канада- Гренландия (6)			Россия №1 (7)			Россия №2 (4)		
	P ₀	t ₂	W ₁₀	P ₀	t ₂	W ₁₀	P ₀	t ₂	W ₁₀	P ₀	t ₂	W ₁₀	P ₀	t ₂	W ₁₀
WRF V4	6.88	4.38	2.13	6.54	4.02	1.81	5.22	4.81	1.50	8.04	4.07	1.26	9.04	4.56	1.14
WRF V8	5.83	3.91	1.79	5.71	3.17	1.56	4.35	5.0	1.58	6.08	3.10	1.35	5.67	5.11	1.18
IMN RAS	7.95	2.92	1.74	5.83	2.7	1.38	4.65	6.73	1.51	5.81	3.18	1.45	4.23	4.42	1.13
ASR 30km	2.62	1.41	1.33	1.73	1.2	1.47	2.0	2.53	0.81	1.27	1.28	0.91	2.08	1.67	0.99

Примечание. В скобках указано количество станций в выбранном регионе, соответствующих критериям ВМО для сравнения моделей.

Таблица 5. Средняя годовая абсолютная ошибка восстановления годового хода по случайным 17 станциям в регионе
Table 5. Average annual absolute error in the restoration of the annual progress for random 17 stations in the region

	Норвегия №1			Норвегия №2			Канада- Гренландия			Россия №1			Россия №2		
	P ₀	t ₂	W ₁₀	P ₀	t ₂	W ₁₀	P ₀	t ₂	W ₁₀	P ₀	t ₂	W ₁₀	P ₀	t ₂	W ₁₀
WRF V4	6.7	4.24	2.12	6.65	4.33	1.79	5.45	5.43	1.51	8.41	4.36	1.32	8.85	4.66	1.12
WRF V8	5.32	3.71	1.9	6.12	3.19	1.54	4.61	5.33	1.51	6.69	3.97	1.39	5.55	5.39	1.12
IMN RAS	8.41	2.93	2.17	6.6	2.26	1.79	6.8	6.52	1.71	6.81	3.71	1.36	5.65	4.15	1.16
ASR 30km	2.24	1.43	1.23	1.55	1.07	1.07	2.04	2.78	0.98	1.93	1.79	1.23	2.02	1.55	1.02

Примечание. P₀ – давление на уровне моря, t₂ – температура на 2 м, W₁₀ – скорость ветра на 10 м. Желтым цветом обозначены наиболее высокие коэффициенты в экспериментах с моделями.

Из экспериментов видно, что в большинстве регионов в экспериментах с региональной моделью годовая ход восстанавливается заметно ближе к наблюдениям, чем с глобальной, причем это видно и для станций, прошедших критерии ВМО, и по случайным 17 станциям.

В табл. 4 и 5 приведены средние по тем же станциям абсолютные ошибки моделирования годовых ходов. Из таблиц видно также, что ошибки по группам российских станций выше ошибок по другим группам для температуры и давления. Видно также, что в большинстве регионов эксперименты с региональной моделью дали меньшие ошибки в воспроизведении годовых ходов. Качественно среднегодовые ошибки мало изменились при выборе станций по критериям ВМО и 17 случайных.

Заключение

В результате работы создана система глобальной и вложенной в нее региональной моделей, позволяющая уточнить прогнозы климата в Арктике путем использования более высокого пространственного

разрешения, специальных параметризаций физических процессов, настроенных на полярный регион.

Было проведено два эксперимента с региональной моделью с различными наборами описания физических процессов в атмосфере за 2004 год.

Кроме того, собраны архивы всех имеющихся в области расчетов станций наблюдения.

Проведенное предварительное сравнение данных моделирования региональной модели и глобальной климатической с наблюдениями и Арктическим реанализом позволяет сделать вывод, что региональная модель с горизонтальным разрешением в 30 км позволяет уточнить годовой ход температуры, давления и ветра.

Необходимо подчеркнуть, что результаты носят предварительный характер. Они пока не позволяют сделать однозначные выводы о том, улучшают или нет расчеты по региональной модели климат, получаемый глобальной моделью, а только показывают, что в самой технической процедуре регионализации ошибок нет.

Работа была поддержана грантом РФФИ №18-05-60184.

Список литературы

1. Brunke, M.A., Cassano J.J., Dawson N., DuVivier A.K., Gutowski Jr.W.J., Hamman J., Maslowski W., Nijssen B., Reeves Eyre J.E., Renteria J.C., Roberts A., Zeng X. Evaluation of Atmosphere-Land-Ocean-Sea Ice Interface Processes in the Regional Arctic System Model Version 1.0 (RASMI.0) Using Local and Globally Gridded Observations // Geoscientific Model Development. 2018. Vol. 11. P. 4817-4841. DOI:10.5194/gmd-11-4817-2018.
2. Chou M.-D., Suarez M.J. A solar radiation parameterization for atmospheric studies // NASA Tech. Rep. NASA/TM-1999-10460. 1999. Vol. 15. 38 p.
3. Ek M. B., Mitchell K. E., Lin Y., Rogers E., Grunmann P., Koren V., Gayno G., Tarpley J. D. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model // J. Geoph. Res. 2003. Vol. 108, no. D22. P. 8851.
4. Grell G.A. Semi-prognostic tests of cumulus parameterization schemes in the middle latitudes: Ph. D. dissertation, University of Miami, Coral Gables, Florida, 225 p.
5. Iacono M.J., Delamere J.S., Mlawer E.J., Shephard M.W., Clough S.A., Collins W.D. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models // J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113. D13103. DOI:10.1029/2008JD009944.
6. Janjic Z.I. The surface layer in NCEP Eta model / 11s Conference on Numerical Weather Prediction, Norfolk, VA, 19-23 August 1996; Amer. Meteor. Soc, Boston, MA. P. 354-355.
7. Kain J.S., Fritsch J.M. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization // J. Atmos. Sci. 1990. Vol. 47, no. 23. P. 2784-2802.
8. Kattsov V., Barrett A. et al. Trends in Arctic sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observations // Geoph. Res. Lett. 2012. Vol. 39. L16502. DOI:10.1029/2012GL052676.
9. Kyo-Sun Sunny Lim, Song-You Hong. Development of an Effective Double-Moment Cloud Microphysics Scheme with Prognostic Cloud Condensation Nuclei (CCN) for Weather and Climate Models // Month. Wea. Rev. 2010. Vol. 138. P. 1587-1612. DOI: 10.1175/2009MWR2968.1.
10. Lim J-O J. The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6) // J. Korean Met. Soc. 2006. Vol. 42. P. 129-151.
11. Mellor G.L., Yamada T. A Hierarchy of Turbulence Closure Models for Planetary Boundary Layers // J. Atmos. Sci. 1974. Vol. 31. P. 1791-1806.

12. Nakanishi M., Niino H. An Improved Mellor–Yamada Level-3 Model with Condensation Physics: Its Design and Verification // *Boundary-Layer Meteorol.* 2004. Vol. 112. P. 1-31.
13. Niu, G.-Y. et al. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements // *J. Geoph. Res.* 2011. Vol. 116. D12109. DOI: 10.1029/2010JD015139.
14. Polar Meteorology Group: The Polar WRF. – <http://polarmet.osu.edu/PWRF>.
15. Screen J.A., Simmonds I. The central role of diminishing sea ice in recent arctic temperature amplification // *Nature.* 2010. Vol. 464. P. 1334-1337. DOI:10.1038/nature09051.
16. Serreze, M., Barrett A., Stroeve J. et al. The emergence of surface-based arctic amplification // *Cryosphere.* 2009. Vol. 3. P. 11-19.
17. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D., Duda M.G., Huang X.Y., Wang W.A. Description of the Advanced Research WRF Version 3 // NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR. 2008. 520 p. DOI:10.5065/D68S4MVH.
18. Takhsha M., Nikiéma O., Lucas-Picher Ph., Laprise R., Hernández-Díaz L., Winger K. Dynamical downscaling with the fifth-generation Canadian regional climate model (CRCM5) over the CORDEX Arctic domain: effect of large-scale spectral nudging and of empirical correction of sea-surface temperature // *Climate Dynamics.* 2018. Vol. 51, no. 1-2. P. 161-186.
19. Tewari M., Chen F., Wang W., Dudhia J., LeMone M.A., Mitchell K., Ek M., Gayno G., Wegiel J., Cuenca R.H. Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model // 20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction, 2004. P. 11-15.
20. Volodin E.M., Mortikov E.V., Kostykin S.V., Galin V.Ya., Lykossov V.N., Gritsun A.S., Diansky N.A., Gusev A.V., Iakovlev N.G., Shestakova A.A., Emelina S.V. Simulation of the modern climate using the INM-CM48 climate model // *Rus. J. Num. Anal. Math. Model.* 2018. Vol. 33, no. 6. P. 367-374.
21. West R., Crisp D., Chen L. Mapping transformations for broadband atmospheric radiation calculations // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.* 1990. Vol. 43, no. 3. P. 191-199.

References

1. Brunke, M.A., Cassano J.J., Dawson N., DuVivier A.K., Gutowski Jr.W.J., Hamman J., Maslowski W., Nijssen B., Reeves Eyre J.E., Renteria J.C., Roberts A., Zeng X. Evaluation of Atmosphere-Land-Ocean-Sea Ice Interface Processes in the Regional Arctic System Model Version 1.0 (RASMI.0) Using Local and Globally Gridded Observations. *Geoscientific Model Development*, 2018, vol. 11, pp. 4817-4841. DOI:10.5194/gmd-11-4817-2018.
2. Chou M.-D., Suarez M.J. A solar radiation parameterization for atmospheric studies. *NASA Tech. Rep. NASA/TM-1999-10460*, 1999, vol. 15, 38 p.
3. Ek M. B., Mitchell K. E., Lin Y., Rogers E., Grunmann P., Koren V., Gayno G., Tarpley J. D. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. *J. Geoph. Res.*, 2003, vol. 108, no. D22, pp. 8851. DOI: 10.1029/2002JD003296
4. Grell G.A. Semi-prognostic tests of cumulus parameterization schemes in the middle latitudes: Ph. D. dissertation, University of Miami, Coral Gables, Florida, 225 p.
5. Iacono M.J., Delamere J.S., Mlawer E.J., Shephard M.W., Clough S.A., Collins W.D. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *J. Geophys. Res.*, 2008, vol. 113, D13103. DOI:10.1029/2008JD009944.
6. Janjic Z.I. The surface layer in NCEP Eta model / 11s Conference on Numerical Weather Prediction, Norfolk, VA, 19-23 August 1996. Amer. Meteor. Soc., Boston, MA, pp. 354-355.
7. Kain J.S., Fritsch J.M. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *J. Atmos. Sci.*, 1990, vol. 47, no. 23, pp. 2784-2802
8. Kattsov V., Barrett A. et al. Trends in Arctic sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observations. *Geoph. Res. Lett.*, 2012, vol. 39, L16502. DOI:10.1029/2012GL052676.

9. *Kyo-Sun Sunny Lim, Song-You Hong*. Development of an Effective Double-Moment Cloud Microphysics Scheme with Prognostic Cloud Condensation Nuclei (CCN) for Weather and Climate Models. *Month. Wea. Rev.*, 2010, Vol. 138, pp. 1587-1612. DOI: 10.1175/2009MWR2968.1.
10. *Lim J-O J*. The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6). *J. Korean Met. Soc.*, 2006, vol. 42, pp. 129-151.
11. *Mellor G.L., Yamada T*. A Hierarchy of Turbulence Closure Models for Planetary Boundary Layers. *J. Atmos. Sci.*, 1974, vol. 31, pp. 1791-1806.
12. *Nakanishi M., Niino H*. An Improved Mellor–Yamada Level-3 Model with Condensation Physics: Its Design and Verification. *Boundary-Layer Meteorol.*, 2004, vol. 112, pp. 1-31.
13. *Niu, G.-Y. et al*. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *J. Geoph. Res.*, 2011, vol. 116, D12109. DOI: 10.1029/2010JD015139.
14. Polar Meteorology Group: The Polar WRF. Available at: <http://polarmet.osu.edu/PWRF>.
15. *Screen J.A., Simmonds I*. The central role of diminishing sea ice in recent arctic temperature amplification. *Nature*, 2010, vol. 464, pp. 1334-1337. DOI:10.1038/nature09051.
16. *Serreze, M., Barrett A., Stroeve J. et al*. The emergence of surface-based arctic amplification. *Cryosphere*, 2009, Vol. 3, pp. 11-19. DOI: 10.5194/tc-3-11-2009.
17. *Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D., Duda M.G., Huang X.-Y., Wang W.A*. Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR, 2008, 520 p. DOI:10.5065/D68S4MVH.
18. *Takhsha M., Nikiéma O., Lucas-Picher Ph., Laprise R., Hernández-Díaz L., Winger K*. Dynamical downscaling with the fifth-generation Canadian regional climate model (CRCM5) over the CORDEX Arctic domain: effect of large-scale spectral nudging and of empirical correction of sea-surface temperature. *Climate Dynamics*, 2018, vol. 51, no. 1-2, pp. 161-186. DOI: 10.1007/s00382-017-3912-6.
19. *Tewari M., Chen F., Wang W., Dudhia J., LeMone M.A., Mitchell K., Ek M., Gayno G., Wegiel J., Cuenca R.H*. Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model. 20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction, 2004, pp. 11-15.
20. *Volodin E.M., Mortikov E.V., Kostykin S.V., Galin V.Ya, Lykossov V.N., Gritsun A.S., Diansky N.A., Gusev A.V., Iakovlev N.G., Shestakova A.A., Emelina S.V*. Simulation of the modern climate using the INM-CM48 climate model. *Rus. J. Num. Anal. Math. Model.*, 2018, vol. 33, no. 6, pp. 367-374.
21. *West R., Crisp D., Chen L*. Mapping transformations for broadband atmospheric radiation calculations. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1990, vol. 43, no. 3, pp. 191-199.

Поступила в редакцию 03.06.2019 г.

Received by the editor 03.06.2019.