

МЕТЕОРОЛОГИЯ

УДК 551.509.323

DOI: 10.17072/2079-7877-2019-3-48-62

**ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЧИСЛЕННОГО ПРОГНОЗА ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СИНОПТИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ В ПЕРМСКОМ КРАЕ****Сергей Владимирович Костарев**ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2576-6219>, Scopus ID: 57205331229,

SPIN-код: 2505-6098, РИНЦ AuthorID: 993950,

e-mail: kostarevsergo@yandex.ru

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург***Игорь Николаевич Русин**ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3683-2696>, Scopus ID: 6602283715,

SPIN-код: 3511-2469, РИНЦ AuthorID: 424049

e-mail: inrusin2008@yandex.ru

Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург

Классическая верификация численных прогнозов погоды представляет собой оценку успешности прогностических моделей для всего спектра наблюдаемых метеорологических условий. Тем не менее для оперативного прогнозирования важно знать ограничения применимости прогностических данных в различных ситуациях. Эта задача может быть решена в рамках условной верификации путем разделения выборки с использованием синоптической типизации. В статье рассматриваются результаты исследования качества прогноза приземной температуры для территории Пермского края по глобальной модели численного прогноза погоды GFS. Для летнего периода дополнительно сравнивались качества прогнозов модели GFS и мезомасштабной модели WRF-ARW. Оценка проведена комплексно по всей выборке случаев, а также дифференцированно в зависимости от наблюдаемой синоптической ситуации. Показано, что наиболее высокое качество прогнозов по модели GFS характерно для осеннего периода. В зимний и весенний периоды наблюдается систематическое занижение прогностической температуры в центральной части антициклона и в теплом секторе циклона соответственно. Установлено, что в летний период модель GFS по сравнению с WRF-ARW позволяет получить более качественные прогнозы приземной температуры. Для обеих моделей летом выявлено улучшение качества прогнозов температуры для различных частей циклонов (за исключением тыловой части) и ухудшение – для малоградиентных полей давления, а также для периферий и центров антициклонов. Выявленные особенности распределения ошибок могут использоваться для коррекции численных прогнозов.

Ключевые слова: численный прогноз погоды, оценка прогноза температуры, синоптическая ситуация, модель GFS, модель WRF-ARW, Пермский край.

QUALITY ASSESSMENT OF THE NUMERICAL TEMPERATURE PREDICTION DEPENDING ON THE SYNOPTIC SITUATION IN THE PERM REGION

Sergey V. Kostarev

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2576-6219>, Scopus ID: 57205331229,

SPIN-code: 2505-6098, SPRI AuthorID: 993950

e-mail: kostarevsergo@yandex.ru

Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg

Igor N. Rusin

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3683-2696>, Scopus ID: 6602283715

SPIN-code: 3511-2469, SPRI AuthorID: 424049

e-mail: inrusin2008@yandex.ru

Main Geophysical Observatory, Saint-Petersburg

The classical verification of numerical weather prediction is assessment of forecast models accuracy over the whole spectrum of meteorological conditions observed in the atmosphere. Nevertheless, for operational forecasting it is important to understand the limitations of forecast data applicability in different situations. This issue can be solved within conditional verification by stratifying the dataset using synoptic typing. The research is devoted to the quality assessment for 2-meter air temperature forecasts based on the GFS global numerical weather prediction (NWP) model in the Perm region. Additionally, the forecast quality of the GFS and WRF-ARW models is compared for the summer season. The quality of forecasting is assessed across the entire sample of cases and sets of various synoptic situations. The best quality of forecasts is observed in autumn. Systematic underestimation of the predicted temperature is noticed in central parts of anticyclones in winter and in warm sectors of cyclones in spring. It is argued that in summer GFS provides more successful forecasts of 2-meter air temperature than the WRF-ARW model. The quality improvement is pointed out for both NWP models in different parts of cyclones (excluding the rear parts) while the decline in quality is noted in low-gradient pressure fields as well as peripheries and central parts of anticyclones. The revealed peculiarities of error distribution can be used for correction of numerical weather forecasts.

Keywords: numerical weather prediction, 2-meter air temperature forecast assessment, synoptic situation, GFS model, WRF-ARW model, Perm region.

Введение

Практическую значимость для оперативного прогнозирования представляет оценка качества воспроизведения полей метеорологических величин глобальными и мезомасштабными моделями численного прогноза погоды (ЧПП). В работах, посвященных верификации численных прогнозов, упоминается целесообразность их дифференцированной оценки в зависимости от синоптической ситуации либо типа атмосферной циркуляции, но до сих пор количество подобных исследований невелико [10; 18; 19].

Дифференцированное определение систематических ошибок может рассматриваться как один из шагов к улучшению систем статистического постпроцессинга [4], а также развития комплексных [16; 17] схем прогноза отдельных метеовеличин.

Целью настоящего исследования является оценка качества прогнозов приземной температуры воздуха для территории Пермского края на срок до 24 ч по модели ЧПП GFS. Для летнего периода дополнительно проведено сравнение результатов прогнозов моделей GFS и WRF-ARW, чтобы оценить возможность применения мезомасштабных моделей при прогнозе приземной температуры. Оценка проводилась не только по всей выборке случаев (комплексное оценивание) с целью сравнения успешности моделей в различные сезоны года,

но и дифференцированно по типам синоптических ситуаций, чтобы обнаружить возможные различия в качестве прогноза, зависящие от наблюдаемых в атмосфере синоптических процессов.

Актуальность исследования обусловлена возможностью применения полученных данных о качестве прогноза в оперативной работе прогностических подразделений. Обобщенные сведения о качестве прогнозов по моделям GFS и WRF-ARW и выводы о характере и величине возникающих в зависимости от типов наблюдаемых синоптических ситуаций ошибок прогнозов являются полезными в оперативной работе.

Исследования качества прогноза температуры воздуха для территории Пермского края по модели WRF-ARW, проведенные для весеннего периода [15], показали, что в начальный период снеготаяния наблюдается значительное систематическое занижение среднесуточной температуры воздуха, обусловленное наличием снежного покрова и неточностью начальных данных модели GFS. Полученные в работе [15] оценки дают основания для проверки применимости модели WRF-ARW для прогноза температуры в другие сезоны года. Однако проведенная в рамках настоящего исследования верификация модели WRF-ARW для летнего периода позволила, как показано ниже, выявить более низкое качество прогнозов по сравнению с глобальной моделью GFS. Учитывая данное обстоятельство, исследование качества прогнозов по модели WRF-ARW для других сезонов не проводилось.

Исследования качества прогнозов модели WRF-ARW для летнего периода проводились для ряда регионов РФ [1; 6; 8]. Хотя результаты исследований противоречивы, в частности, в знаке средней систематической ошибки прогноза, большинство авторов [1; 8] отмечают занижение прогностической температуры моделью WRF-ARW на величину от 0,3 до 1,5°. Кроме того, в работах [1; 6; 8] установлено, что средняя абсолютная ошибка прогноза составляет от 1,7 до 2,8°.

В работах [1; 16; 17; 20] приведены оценки качества прогнозов приземной температуры по модели GFS. В летний период средняя абсолютная ошибка изменяется от 1,5 до 2,7°, средняя систематическая ошибка составляет от -0,8 до 1,2°. В зимний период средняя абсолютная ошибка составляет от 2,0 до 2,5°, а средняя систематическая ошибка варьирует от -0,8 до 0,6°.

Таким образом, согласно исследованиям разных авторов, оценки качества прогнозов температуры воздуха по моделям GFS и WRF-ARW в РФ имеют значительную неопределённость, что обуславливает актуальность и важность их получения для территории Пермского края в летний период с разделением выборки по синоптическим ситуациям. Важно отметить, что анализ работ по верификации моделей ЧПП позволил выявить непостоянство знака систематической ошибки при оценке прогностической приземной температуры за разные годы по одной и той же модели, что объясняется межгодовой изменчивостью атмосферной циркуляции [21].

Материалы и методы исследования

Для оценки качества прогноза срочной приземной температуры воздуха на территории Пермского края применялись две модели: глобальная GFS (NCEP, США) и мезомасштабная WRF-ARW (NCAR, США). Использовались ежедневные прогнозы модели GFS от 00 ч ВСВ на срок до 24 ч с выдачей результатов через 3 ч за центральные месяцы сезонов года (июль и октябрь 2017 г., а также январь и апрель 2018 г.). Для верификации модели WRF-ARW привлекались прогнозы за июль 2017 г.

Гидродинамическая модель GFS – глобальная, спектральная, с полушарной схемой интегрирования по времени и редуцированной широтно-долготной сеткой [3; 12]. В открытом доступе [22; 24] содержатся файлы счета модели GFS с пространственным разрешением 0,25°, 0,5°, 1° и 2,5° [3]. В исследовании применялись прогностические данные GFS с горизонтальным разрешением 0,5° и временным разрешением 3 ч, поскольку прогнозы

на более детальной сетке (с шагом $0,25^\circ$) хранятся на сервере не более 10 дней. Более подробная информация о характеристиках модели GFS приведена в работе [23].

Модель WRF-ARW (версия 3.8.1) – мезомасштабная гидродинамическая модель прогноза состояния атмосферы, созданная с целью оперативного прогнозирования и решения исследовательских задач. Основные принципы функционирования модели WRF-ARW версии 3.8.1, а также ее отличия от предыдущих версий подробно изложены в работе [26]. Программный комплекс модели реализован на многопроцессорном вычислительном комплексе (МВК) с гибридной архитектурой «ПГНИУ-Кеплер», установленном в ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

Инициализация модели WRF-ARW производилась с использованием результатов объективного анализа и прогноза глобальной модели GFS в формате GRIB2. Расчетная область (домен) составляла 278×278 узлов с горизонтальным разрешением 7200 м и центром в г. Пермь. Число вертикальных уровней составляло 38. Временной шаг модели был равен 60 с. Параметризации физических процессов (табл. 1) были выбраны с учетом опыта прогнозирования по модели WRF-ARW на территории Пермского края [14], а также рекомендаций непосредственных разработчиков модели, изложенных в [25]. Более подробные сведения о параметризациях физических процессов содержатся в работах [5; 7; 25].

Таблица 1

Параметризации физических процессов в модели WRF-ARW
Parameterizations of physical processes in WRF-ARW

<i>Физический процесс</i>	<i>Тип параметризации</i>
Микрофизика облачности	Схема Томпсона
Длинноволновая радиация	Схема RRTM (Rapid Radiative Transfer Model)
Коротковолновая радиация	Схема Дудья
Процессы в приземном слое	Схема Монины-Обухова с вязким подслоем Карлсона-Боланда и стандартными функциями подобия
Планетарный пограничный слой	Схема университета Yonsei
Подстилающая поверхность	Модель Noah
Конвекция	Схема Беттса-Миллера-Янича

Обработка выходной продукции моделей GFS и WRF-ARW с целью получения прогностических значений приземной температуры воздуха в точках расположения метеостанций происходила в несколько этапов:

1. Конвертация прогностических данных из формата GRIB2 в формат NetCDF-3 и отбор необходимой переменной (температура воздуха на уровне 2 м над земной поверхностью) с использованием программного обеспечения NDFD tkDegrib 2.02.

2. В связи с малым пространственным разрешением модели, для файлов счета модели WRF-ARW, значения прогностической приземной температуры воздуха в точках расположения метеостанций были получены путём присвоения значений из ближайших узлов расчётной сетки. Данная процедура выполнялась с помощью алгоритма, реализованного на языке Python.

3. К прогностическим данным модели GFS из узлов расчётной сетки применялась процедура билинейной интерполяции на точки расположения метеостанций. Билинейная интерполяция также была реализована на языке Python с использованием библиотеки Metpy.

Для сопоставления прогностических и фактических значений приземной температуры воздуха привлекались данные 22 метеостанций Пермского края. При выделении типов синоптических ситуаций были учтены опыт проведения синоптической типизации для исследования очень сильных снегопадов [9], а также особенности синоптических процессов в регионе [13]. В отличие от приведенной в работе [9] типизации в данной работе основное внимание уделяется характеристикам барического поля, что позволило выделить 9 типов синоптических ситуаций:

1. Центр циклона в сочетании с фронтом окклюзии.
2. Передняя часть циклона в сочетании с теплым фронтом.
3. Теплый сектор циклона.
4. Тыл циклона в сочетании с холодным фронтом.
5. Малоградиентное поле пониженного давления.
6. Центр антициклона.
7. Восточная и южная периферии антициклона.
8. Северная и западная периферии антициклона.
9. Малоградиентное поле повышенного давления.

Следует отметить, что малоградиентные поля давления в Пермском крае являются типичными для летнего сезона, вследствие чего в остальное время в исследуемой выборке случаев они не отмечались. Оценка качества прогнозов проводилась в 2 этапа: по всей выборке случаев, а также для каждой из выделенных синоптических ситуаций. В процессе оценивания использовались характеристики (метрики), приведенные в [11]: δ – средняя абсолютная ошибка, σ – среднеквадратическая ошибка, δ' – средняя арифметическая (систематическая) ошибка прогноза, ε – средняя относительная ошибка прогноза. Для комплексного оценивания применялись все обозначенные метрики, в то время как оценивание в зависимости от синоптической ситуации проводилось с использованием только средней абсолютной и систематической ошибок.

Результаты и их обсуждение

Ниже представлены обобщенные данные о качестве прогнозов приземной температуры воздуха по моделям GFS и WRF-ARW, полученные в результате комплексного оценивания. В табл. 2 приведены осредненные по 8 срокам значения метрик, используемых для оценок качества прогнозов, без разбивки по синоптическим ситуациям для моделей GFS и WRF-ARW по данным 22 метеостанций Пермского края.

Таблица 2

Обобщенные характеристики качества прогноза приземной температуры воздуха
(GFS/WRF-ARW)
Generalized metrics of the surface temperature forecast quality (GFS/WRF-ARW)

Месяц	$\delta, ^\circ$	$\sigma, ^\circ$	$\delta', ^\circ$	ε
Июль	1,5/1,8	2,0/2,3	-0,2/-1,1	0,69/0,83
Октябрь	1,3	1,7	0,1	0,55
Январь	1,9	2,5	-0,5	0,52
Апрель	1,9	2,4	-1,0	0,59

В летний период по модели GFS средняя абсолютная ошибка прогноза температуры на метеостанциях Пермского края варьирует от 1,2 до 2,1°, а в среднем по территории ее значение равно 1,5°. Осредненное по территории значение среднеквадратической ошибки составляет 2,0°. Ее значения для метеостанций в целом повторяют ход значений средней абсолютной ошибки, поэтому подробное описание ее распределения не приводится. Средняя

систематическая ошибка изменяется по территории от $-1,0$ до $0,4^\circ$. Для большинства станций характерно небольшое занижение температуры моделью GFS, что подтверждается и средним значением δ' по территории, равным $-0,2^\circ$. Средняя относительная ошибка прогноза, показывающая отношение абсолютной ошибки прогноза к межсуточной изменчивости температуры в среднем по территории для модели GFS, равна $0,69$. Принято считать, что чем меньше ε , тем лучше прогноз. При значении $\varepsilon = 1$ качество методических прогнозов находится на уровне инерционных прогнозов, а при $\varepsilon > 1$ методические прогнозы хуже инерционных. Для большинства станций ε лежит в пределах от $0,5$ до $0,8$.

Качество прогнозов приземной температуры по модели WRF-ARW хуже, чем по модели GFS, что подтверждают сведения из табл. 2. Средняя абсолютная ошибка в среднем по территории равна $1,8^\circ$. Средняя систематическая ошибка по модели WRF отрицательна на всех станциях и в целом для региона составляет $-1,1^\circ$. Таким образом, по данным модели WRF-ARW наблюдается устойчивое и существенное занижение прогностической температуры воздуха, характерное для всей исследуемой территории. Средняя относительная ошибка прогноза температуры для модели WRF-ARW составляет в среднем $0,83$, что говорит о невысоком качестве прогнозов. На ряде станций (Верещагино, Оханск, Кунгур, Оса) качество прогнозов по модели приближается к качеству инерционных прогнозов. На станциях Чермоз и Вая $\varepsilon > 1$ – качество модельных прогнозов хуже инерционных.

Данные табл. 2 свидетельствуют о том, что модель GFS лучше всего воспроизводит поле приземной температуры осенью – средняя абсолютная ошибка не превышает $1,3^\circ$, при этом средняя систематическая ошибка близка к нулю. Наименьшая точность прогнозов по модели GFS зафиксирована в зимний и весенний периоды – средняя абсолютная ошибка составляет $1,9^\circ$. Средняя систематическая ошибка равна $-0,5$ и $-1,0^\circ$ соответственно, что позволяет судить о систематическом занижении прогностической температуры. Тем не менее зимой наблюдается наименьшая относительная ошибка прогнозов ($\varepsilon=0,52$), что, вероятно, связано с наибольшей межсуточной изменчивостью температуры по сравнению с другими сезонами года.

Обобщенные результаты исследования (без разбивки по синоптическим ситуациям) позволяют сделать выводы о лучшем качестве прогнозов и целесообразности применения модели GFS для прогноза приземной температуры в летний период. Глобальная модель GFS позволяет более точно прогнозировать приземную температуру в летний период, чем мезомасштабная модель WRF-ARW, что подтверждается значениями всех используемых для оценки метрик. Обе модели занижают приземную температуру, но особенно велико систематическое занижение температуры моделью WRF-ARW (в среднем на $1,1^\circ$ за весь период исследования). Таким образом, применение мезомасштабной модели WRF, требующей значительных вычислительных ресурсов, для прогноза приземной температуры воздуха летом нецелесообразно без дополнительной доводки и статистической корректировки результатов прогноза. Модель GFS более успешно воспроизводит приземную температуру в летний и осенний периоды по сравнению с зимой и весной.

В дальнейшем приводятся результаты оценки качества прогнозов приземной температуры в летний период по моделям GFS и WRF-ARW в зависимости от наблюдаемой синоптической ситуации и времени суток. Необходимость учета времени суток обусловлена особенностями хода радиационного и теплового баланса подстилающей поверхности, влияющих на формирование приземной температуры воздуха.

В табл. 3 приведены сведения о средней абсолютной и систематической ошибке по моделям GFS и WRF-ARW в зависимости от синоптической ситуации в летний период. Наибольшая средняя абсолютная ошибка по модели GFS наблюдается ночью в малоградиентных полях пониженного давления и различных частях антициклонов (от $1,8$ до $2,0^\circ$), наименьшая – в дневные часы в центральных частях и теплых секторах циклонов (от

1,2 до 1,3°). В остальных случаях δ близка к среднему значению по всей выборке, составляющему 1,5°.

Данные о средней систематической ошибке из табл. 3 свидетельствуют о том, что δ' по модели GFS положительна почти во всех синоптических ситуациях днем и отрицательна ночью. Наибольшее завышение температуры моделью отмечается днем в передних частях циклонов (на 0,8°), а наибольшее занижение – ночью в тыловых частях циклонов, малоградиентных полях пониженного давления, а также на восточных и южных перифериях антициклонов (на 1,2–1,7°).

Таблица 3

Характеристики качества прогноза приземной температуры воздуха в зависимости от синоптической ситуации (GFS/WRF-ARW, июль)
Metrics of surface temperature forecast quality depending on synoptic situation (GFS/WRF-ARW, July)

Тип синоптической ситуации	$\delta, ^\circ$		$\delta', ^\circ$	
	День	Ночь	День	Ночь
Центр циклона в сочетании с фронтом окклюзии	1,2/1,5	1,4/1,6	-0,3/-1,0	-1,0/-1,3
Передняя часть циклона в сочетании с теплым фронтом	1,7/1,6	1,5/1,7	0,8/-0,7	-0,2/-0,4
Теплый сектор циклона	1,3/1,8	1,6/1,7	0,2/-1,1	-0,8/-0,7
Тыл циклона в сочетании с холодным фронтом	1,6/1,7	1,5/2,0	0,5/-0,6	-1,2/-1,7
Малоградиентное поле пониженного давления	1,4/1,9	2,0/1,9	0,5/-1,6	-1,7/-1,5
Центр антициклона	1,6/2,3	1,8/1,8	-0,1/-1,6	-1,0/-1,1
Восточная/южная периферия антициклона	1,5/2,1	2,0/2,6	0,3/-1,4	-1,4/-2,1
Северная/западная периферия антициклона	1,5/1,7	1,9/1,9	0,3/-0,8	-1,1/-1,2
Малоградиентное поле повышенного давления	1,3/1,9	1,5/1,9	0,3/-1,2	0,3/0,2

Наибольшая средняя абсолютная ошибка прогнозов по модели WRF-ARW (табл. 3) наблюдается в малоградиентных полях давления, на восточных и южных перифериях антициклонов, днем в центрах антициклонов, а также ночью в тыловых частях циклонов (от 1,9 до 2,6°). Наименьшие ошибки отмечены в центральных и передних частях циклонов (от 1,5 до 1,7°). В остальных синоптических ситуациях значения δ близки к среднему значению по выборке, которое равно 1,8°.

Данные табл. 3 иллюстрируют выявленное ранее систематическое занижение температуры моделью WRF-ARW: прогностическая температура занижена почти при всех синоптических ситуациях, за исключением малоградиентных полей повышенного давления в ночные часы. Самое значительное занижение температуры моделью WRF-ARW (на 1,7–2,1°) зафиксировано в ночные часы в тыловых частях циклонов и на восточных и южных перифериях антициклонов. Наименьшее занижение отмечается в передних частях циклонов, а также в дневные часы в тылу циклонов (на 0,4–0,7°).

Осенью модель GFS наиболее успешно воспроизводит поле приземной температуры: значения средних абсолютных и систематических ошибок малы во всех выделенных синоптических ситуациях (табл. 4). Небольшое увеличение средней абсолютной ошибки наблюдаются на северных и западных перифериях антициклонов, а также в примыкающих к ним передних частях циклонов. Значение средней систематической ошибки не превышает 1° для всех синоптических ситуаций, за исключением восточных и южных периферий антициклонов в дневные часы. Учитывая малую величину ошибок и их сравнительно невысокую степень изменчивости для различных синоптических ситуаций, можно утверждать, что на данном этапе исследования обнаружить зависимость качества прогноза от типа синоптической ситуации в осенний период не удалось.

Метеорология

Оценка качества численного прогноза температуры воздуха...

Таблица 4

Характеристики качества прогноза приземной температуры воздуха в зависимости от синоптической ситуации (GFS, октябрь)
Metrics of surface temperature forecast quality depending on synoptic situation (GFS, October)

Тип синоптической ситуации	$\delta, ^\circ$		$\delta', ^\circ$	
	День	Ночь	День	Ночь
Центр циклона в сочетании с фронтом окклюзии	0,7	0,8	0,5	0,0
Передняя часть циклона в сочетании с теплым фронтом	1,5	1,5	0,7	0,4
Теплый сектор циклона	1,3	1,4	-0,3	-0,1
Тыл циклона в сочетании с холодным фронтом	0,8	1,0	0,2	0,0
Центр антициклона	1,0	1,3	0,4	0,4
Восточная/южная периферия антициклона	1,5	1,0	1,1	0,0
Северная/западная периферия антициклона	1,6	1,5	-0,3	0,0

В зимний период модель GFS в целом занижает прогностическую температуру (за исключением центра циклона и восточной/южной периферии антициклона). Наибольшее занижение наблюдается в ночные часы в центральных частях антициклонов (табл. 5). Средняя систематическая ошибка для данного типа синоптической ситуации равна $-1,6^\circ$ в дневные часы и $-1,9^\circ$ ночью. Для центральных частей антициклонов также характерны наибольшие значения средней абсолютной ошибки, достигающей в ночные часы $2,6^\circ$. Вероятно, данный факт объясняется тем, что в условиях ясного неба и устойчивой стратификации приземного слоя воздуха над снежным покровом модель GFS имеет тенденцию к еще большему увеличению степени устойчивости и, как следствие, занижению приземной прогностической температуры. Этот механизм особенно выражен в ночные часы, но зимой в условиях отрицательного радиационного баланса приземная инверсия обычно сохраняется и в дневные часы (при условии неизменности синоптической ситуации), вследствие чего сохраняются знак и величина систематической ошибки. Следует отметить, что ранее недостатки описания приземной температуры в подобных условиях были выявлены для ряда других моделей ЧПП при их применении на территории РФ [2; 20].

Таблица 5

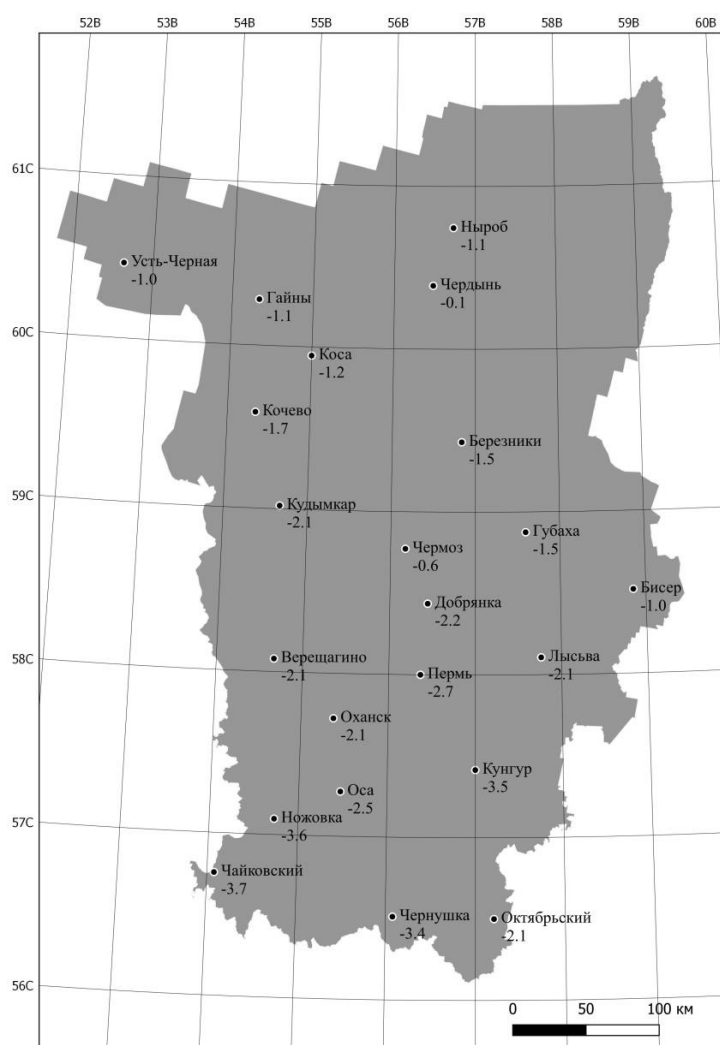
Характеристики качества прогноза приземной температуры воздуха в зависимости от синоптической ситуации (GFS, январь)
Metrics of surface temperature forecast quality depending on synoptic situation (GFS, January)

Тип синоптической ситуации	$\delta, ^\circ$		$\delta', ^\circ$	
	День	Ночь	День	Ночь
Центр циклона в сочетании с фронтом окклюзии	1,6	0,8	1,3	0,4
Передняя часть циклона в сочетании с теплым фронтом	1,3	2,9	-0,2	-0,7
Теплый сектор циклона	1,3	1,4	-0,6	-0,5
Тыл циклона в сочетании с холодным фронтом	1,1	1,7	-0,6	-0,6
Центр антициклона	2,5	2,6	-1,6	-1,9
Восточная/южная периферия антициклона	2,2	2,2	0,8	0,6
Северная/западная периферия антициклона	1,7	2,0	-0,2	-1,1

Таблица 6

Характеристики качества прогноза приземной температуры воздуха в зависимости от синоптической ситуации (GFS, апрель)
Metrics of surface temperature forecast quality depending on synoptic situation (GFS, April)

Тип синоптической ситуации	$\delta, ^\circ$		$\delta', ^\circ$	
	День	Ночь	День	Ночь
Центр циклона в сочетании с фронтом окклюзии	1,5	2,0	-0,3	-0,5
Передняя часть циклона в сочетании с теплым фронтом	2,3	2,0	-1,2	-1,1
Теплый сектор циклона	2,6	2,2	-2,0	-1,8
Тыл циклона в сочетании с холодным фронтом	1,4	1,6	-0,7	-0,9
Центр антициклона	1,3	2,3	-0,7	-0,4
Восточная/южная периферия антициклона	1,4	1,8	-1,1	-1,0
Северная/западная периферия антициклона	1,8	2,1	-0,6	-0,8



Распределение значений средней систематической ошибки температуры ($\delta', ^\circ$) в теплых секторах циклонов в дневные часы в Пермском крае (GFS, апрель)
Distribution of mean error of surface temperature ($\delta', ^\circ$) in warm sectors of cyclones at daytime in the Perm region (GFS, April)

Весной модель GFS систематически занижает температуру во всех синоптических ситуациях (табл. 6), однако наибольшее занижение, составляющее в среднем $-2,0^{\circ}$, отмечается днем в теплых секторах циклонов (рисунок). Вероятно, наблюдаемый эффект объясняется наличием на исследуемой территории снежного покрова и некорректным учетом его влияния в модели на приземную температуру весной (в период исследования разрушение устойчивого снежного покрова произошло в центральной и южной частях региона 15–20 апреля). Модель переоценивает степень трансформации поступающей в теплое секторе циклона воздушной массы, а также недооценивает прогрев приземного слоя воздуха в дневные часы над снежным покровом.

Из рисунка следует, что для Пермского края характерно возрастание средней систематической ошибки в направлении с северо-востока на юго-запад. Самое значительное занижение прогностической температуры, составляющее от $-3,4$ до $-3,7^{\circ}$, наблюдается на станциях в южной части региона с относительно невысокой степенью покрытия лесом. Возможно, залесенность играет определенную роль в формировании величины δ' , поскольку наличие сплошного лесного покрова приводит к уменьшению альбедо и увеличению поглощения поступающей солнечной радиации, сглаживая описанный ранее эффект недооценки величины дневного прогрева.

Выводы

В работе исследовано качество прогноза приземной температуры воздуха по глобальной модели GFS и мезомасштабной модели WRF-ARW для территории Пермского края. Оценка качества прогнозов проведена в 2 вариантах: комплексно по всей выборке случаев, а также дифференцированно в зависимости от наблюдаемой синоптической ситуации. В результате проведенной работы можно сформулировать следующие основные выводы:

1. Глобальная модель GFS в рассматриваемом регионе более адекватно воспроизводит поле приземной температуры летом, что подтверждается улучшением всех оценок согласно работе [11], по сравнению с мезомасштабной моделью WRF-ARW. Отмечено систематическое занижение прогностической температуры моделью WRF-ARW, составляющее в среднем $1,1^{\circ}$. Таким образом, применение мезомасштабной модели WRF-ARW, требующей значительных вычислительных ресурсов, для прогноза приземной температуры воздуха летом нецелесообразно без дополнительной доводки и статистической коррекции результатов.

2. Обнаружена зависимость качества прогноза приземной температуры летом по моделям GFS и WRF-ARW от наблюдаемой синоптической ситуации. В летний период отмечено наиболее существенное занижение (на $1,2-2,1^{\circ}$) прогностической температуры воздуха в ночные часы в тылу циклонов и в холодных частях антициклонов (восточная и южная периферии). В описанных ситуациях более выражено занижение температуры по модели WRF-ARW, чем по GFS.

3. В результате проведенного исследования в осенний период выявить зависимость качества прогнозов модели GFS от типов синоптических ситуаций не удалось. Зимой отмечено систематическое занижение моделью GFS прогностической температуры в центральных частях антициклонов, особенно выраженное в ночные часы и связанное, по-видимому, с недостатками моделирования характеристик пограничного слоя в условиях сильно устойчивой стратификации воздуха. Весной модель GFS систематически занижает температуру во всех синоптических ситуациях, однако наибольшее занижение зафиксировано днем в теплых секторах циклонов, что, вероятно, объясняется переоценкой модели степени трансформации поступающих воздушных масс над снежным покровом.

Выявленные в ходе исследования зависимости качества прогноза по моделям GFS и WRF-ARW от наблюдаемых синоптических ситуаций для различных сезонов года могут

быть полезны в оперативной работе при составлении краткосрочных прогнозов температуры воздуха специалистами-синоптиками. Полученные результаты позволяют продолжить более детальные исследования с целью выявления механизмов возникновения описанных систематических ошибок. Более того, данные о величине ошибок могут служить основой для создания системы статистической коррекции результатов прогноза ЧПП при условии увеличения выборки и выполнения аналогичных исследований для других заблаговременностей прогноза.

Библиографический список

1. *Багров А.Н.* Сравнительная оценка успешности прогнозов элементов погоды ряда отечественных и зарубежных моделей атмосферы различного масштаба (в период с 1 мая по 30 сентября 2010 г.) // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2011. №38. С. 14–27.
2. *Бундель А.Ю., Кирсанов А.А., Муравьев А.В., Ривин Г.С., Розинкина И.А., Блинов Д.В.* Первые результаты оценки успешности мезомасштабных численных прогнозов COSMO-Ru, выпускаемых в рамках метеообеспечения Олимпиады Сочи-2014 // Труды ГМЦ РФ. 2014. №352. С. 37–54.
3. *Быков А.В., Ветров А.Л., Калинин Н.А.* Прогноз опасных конвективных явлений в Пермском крае с использованием глобальных прогностических моделей // Труды ГМЦ РФ. 2017. №363. С. 101–119.
4. *Васильев П.П., Васильева Е.Л., Горлач И.А.* Среднесрочный прогноз температуры воздуха и результаты его испытания // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2010. №37. С. 3–14.
5. *Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д.* Численные прогнозы погоды по негидростатическим моделям общего пользования WRF-ARW и WRF-NMM // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада, 2010. С. 94–135.
6. *Вербицкая Е.М., Романский С.О.* Результаты испытаний краткосрочных оперативных прогнозов мезомасштабной модели WRF-ARW «ХАБ-15» в пунктах Дальневосточного региона России // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2016. №43. С. 32–62.
7. *Жупанов В.Д., Вельтищев Н.Ф.* Информация о модели общего пользования WRF-NMM. М., 2007. 124 с.
8. *Кинжер Л.И., Барашкова Н.К., Ахметшина А.С., Барт А.А., Поляков Д.В.* Оценка точности численных прогнозов метеорологических условий в районе г. Томска с использованием модели WRF // Вестник Томского государственного университета. 2013. №374. С. 174–178.
9. *Пицальникова Е.В.* Синоптическая классификация очень сильных снегопадов в Пермском крае // Географический вестник. 2017. №1(40). С. 85–92. doi 10.17072/2079-7877-2017-1-85-92.
10. *Пицальникова Е.В., Калинин Н.А., Шихов А.Н., Связов Е.М., Ветров А.Л.* Зависимость успешности численного прогноза обильных снегопадов по модели WRF от синоптической ситуации // Современные проблемы географии и геологии к 100-летию открытия естественного отделения в Томском государственном университете: мат. IV Всерос. науч.-практ. конф. с межд. участием. Томск, 2017. С. 315–318.
11. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов РД № 52.27.284-91: метод. указания. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 149 с.
12. *Толстых М.А.* Глобальные модели атмосферы: современное состояние и перспективы развития // Труды ГМЦ РФ. 2016. № 359. С. 5–32.

13. Хандожко Л.А. Региональные синоптические процессы. Л.: Изд-во Ленин. гидромет. института, 1988. 103 с.
14. Шихов А.Н., Быков А.В. Оценка качества прогноза мезомасштабных конвективных систем на Западном Урале с помощью модели WRF и спутниковых данных MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. №1. С. 137–148. doi 10.21046/2070-7401-2016-13-1-137-148.
15. Шихов А.Н., Связов Е.М. Прогнозирование динамики процесса снеготаяния на Западном Урале с применением мезомасштабной модели WRF/ARW // Современные проблемы науки и образования. 2013. №4. URL: www.science-education.ru/110-9962 (дата обращения: 22.12.2018).
16. Bagrov A.N., Bykov Ph.L., Gordin V.A. Complex forecast of surface meteorological parameters // Russian Meteorology and Hydrology. 2014. Vol. 39. No.5. P. 283–291. doi 10.3103/s106837391405001x.
17. Bagrov A.N., Bykov Ph.L., Gordin V.A. Operative scheme for the short-range complex forecasting of surface air temperature and humidity // Russian Meteorology and Hydrology. 2018. Vol. 43. No.8. P. 495–505. doi 10.3103/s1068373918080010.
18. Bundel' A.Yu., Astakhova E.D., Rozinkina I.A., Alferov D.Yu., Semenov A.E. Verification of short- and medium-range precipitation forecasts from the ensemble modeling system of the Hydrometcenter of Russia // Russian Meteorology and Hydrology. 2011. Vol. 36. No.10. P. 653–662. doi 10.3103/s1068373911100025.
19. Gofa F., Tzeferi, D., Raspanti, A. Using synoptic classification to evaluate an operational weather forecasting system // Advances in Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics. Chapter: Part I / Eds. Helmis, C.G. and Nastos, P.T. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. С. 109–116. doi 10.1007/978-3-642-29172-2_16.
20. Martynova Yu.V., Zaripov R.B., Krupchatnikov V.N., Petrov A.P. Estimation of the quality of atmospheric dynamics forecasting in the Siberian region using the WRF-ARW mesoscale model // Russian Meteorology and Hydrology. 2014. Vol. 39. No.7. P. 440–447. doi 10.3103/s1068373914070024.
21. Muravev A.V., Bundel' A.Yu., Kiktev D.B., Smirnov A.V. Verification of mesoscale forecasts in the 2014 Olympic Games region. Part II: Preliminary results of diagnostic evaluation of quality and calibration of the forecasts by the COSMO-RU2 model // Russian Meteorology and Hydrology. 2013. Vol. 38. No.12. P. 797–807. doi 10.3103/s1068373913120017.
22. National Centers for Environmental Information. URL: www.ncdc.noaa.gov (дата обращения: 01.02.2018).
23. NCEP GFS. URL: www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/moorthi/gam.html (дата обращения: 25.12.2018).
24. NOAA Operational Model Archive and Distribution System (NOMADS). URL: www.nomads.ncdc.noaa.gov (дата обращения: 01.02.2018).
25. Skamarock W.C. et al. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Techn. Note –475 + STR, June 2008. 125 p.
26. Wang W., Bruyere C., Duda M., Dudhia J. WRF-ARW Version 3 Modeling System User's Guide. National Center for Atmospheric Research: Boulder, CO. 2017. 434 p.

References

1. Bagrov, A.N. (2011), “Comparative assessment of forecast successfulness of weather elements from a number of domestic and foreign atmosphere models of various scale (from 1st of May to 30th of September 2010)”, *The results of testing of new and enhanced technologies, models and methods of hydrometeorological forecasts*, no. 38, pp. 14–27.
2. Bundel', A.Yu., Kirsanov, A.A., Murav'ev, A.V., Rivin, G.S., Rozinkina, I.A. and Blinov, D.V. (2014), “The first results of successfulness assessment of mesoscale numerical COSMO-Ru

forecasts released as a part of Sochi 2014 Olympic Games meteorological services”, *MGO Proceedings*, no. 352, pp. 37–54.

3. Bykov, A.V., Vetrov, A.L. and Kalinin, N.A. (2017), “Forecasting of hazardous convective weather effects in Perm region using global weather prediction models”, *Proceedings of Hydrometeorological center of Russia*, no. 363, pp. 101–119.

4. Vasil'ev, P.P., Vasil'eva, E.L. and Gorlach, I.A. (2010), “Middle-range forecast of surface air temperature and the results of its testing”, *The results of testing of new and enhanced technologies, models and methods of hydrometeorological forecasts*, no. 37, pp. 3–14.

5. Vel'tishchev, N.F. and Zhupanov, V.D. (2010), “Numerical weather forecasts from non-hydrostatic models of general use WRF-ARW and WRF-NMM”, *80 let Gidrometcentru Rossii* [80th anniversary of Hydrometeorological center of Russia], Triada, Moscow, Russia, pp. 94–135.

6. Verbickaya, E.M. and Romanskij, S.O. (2016), “The results of testing of short-range operative forecasts from mesoscale model WRF-ARW «HAB-15» in the settlements of far East region of Russia”, *The results of testing of new and enhanced technologies, models and methods of hydrometeorological forecasts*, no. 43, pp. 32–62.

7. Zhupanov, V.D. and Vel'tishchev, N.F. (2007), *Informaciya o modeli obshchego pol'zovaniya WRF-NMM* [Information on model of general use WRF-NMM], Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Roshydromet), Moscow, Russia.

8. Kinzher, L.I., Barashkova, N.K., Ahmetshina, A.S., Bart, A.A. and Polyakov, D.V. (2013), “Assessment of accuracy of numerical forecasts of meteorological conditions in the Tomsk city surroundings using WRF model”, *Bulletin of TSU*, no. 374, pp. 174–178.

9. Pishchal'nikova, E.V. (2017), “Synoptic classification of very heavy snowfalls in Perm region”, *Geographical bulletin*, no. 1(40), pp. 85–92. doi 10.17072/2079-7877-2017-1-85-92.

10. Pishchal'nikova, E.V., Kalinin, N.A., Shihov, A.N., Sviyazov, E.M. and Vetrov, A.L. (2017), “Dependency of successfulness of numerical forecast of heavy snowfalls from WRF model on synoptic situation”, *Sovremennye problemy geografii i geologii k 100-letiyu otkrytiya estestvennogo otdeleniya v Tomskom gosudarstvennom universitete* [Proceedings of the Modern issues of geography and geology, devoted to the 100th anniversary of opening of natural sciences department in Tomsk state university], *IV Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferenciya s mezhdunarodnym uchastiem* [4th Russian scientific-practical conference with international participation], Tomsk, Russia, 16-19 October 2017, pp. 315–318.

11. *Guideline. Carrying out production (expeditious) tests of new and advanced methods of hydrometeorological and heliogeophysical forecasts* (1991), RD No. 52.27.284-91, Leningrad, Gidrometeoizdat, Russia.

12. Tolstykh, M.A. (2016), “Global models of the atmosphere: the current state and prospects of development”, *Proceedings of Hydrometeorological center of Russia*, no. 359, pp. 5–33.

13. Handozhko, L.A. (1988), *Regional'nye sinopticheskie processy* [Regional meteorological processes], Leningrad meteorological university, Leningrad, Russia.

14. Shihov, A.N. and Bykov, A.V. (2016), “Assessment of quality of mesoscale convective systems forecast in the Western Urals from WRF model and MODIS satellite data”, *Modern issues of remote sensing of the Earth from the space*, vol. 13, no. 1, pp. 137–148. doi 10.21046/2070-7401-2016-13-1-137-148.

15. Shihov, A.N. and Sviyazov, E.M. (2013), “Forecasting of dynamics of snowmelt in the Western Urals using mesoscale WRF/ARW model”, *Modern issues of science and education* [Electronic], no. 4, available at: www.science-education.ru/110-9962 (accessed 22 December 2018).

16. Bagrov, A.N., Bykov, Ph.L. and Gordin, V.A. (2014), “Complex forecast of surface meteorological parameters”, *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 39, no. 5, pp. 283–291. doi 10.3103/s106837391405001x.

17. Bagrov, A.N., Bykov, Ph.L. and Gordin, V.A. (2018), "Operative scheme for the short-range complex forecasting of surface air temperature and humidity", *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 43, no. 8, pp. 495–505. doi 10.3103/s1068373918080010.

18. Bundel', A.Yu., Astakhova, E.D., Rozinkina, I.A., Alferov, D.Yu. and Semenov, A.E. (2011), "Verification of short- and medium-range precipitation forecasts from the ensemble modeling system of the Hydrometcenter of Russia", *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 36, no. 10, pp. 653–662. doi 10.3103/s1068373911100025

19. Gofa F., Tzeferi, D. and Raspanti, A. (2012), "Using synoptic classification to evaluate an operational weather forecasting system", in Helmis, C.G. and Nastos, P.T. (ed.), *Advances in Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics. Chapter: Part I*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Germany, pp. 109–116. doi 10.1007/978-3-642-29172-2_16

20. Martynova, Yu.V., Zaripov, R.B., Krupchatnikov, V.N. and Petrov, A.P. (2014), "Estimation of the quality of atmospheric dynamics forecasting in the Siberian region using the WRF-ARW mesoscale model", *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 39, no. 7, pp. 440–447. doi 10.3103/s1068373914070024.

21. Muravev, A.V., Bundel', A.Yu., Kiktev, D.B. and Smirnov, A.V. (2013), "Verification of mesoscale forecasts in the 2014 Olympic Games region. Part II: Preliminary results of diagnostic evaluation of quality and calibration of the forecasts by the COSMO-RU2 model", *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 38, no. 12, pp. 797–807. doi 10.3103/s1068373913120017

22. National Centers for Environmental Information, available at: www.ncdc.noaa.gov (accessed 01 February 2018).

23. NCEP GFS, available at: www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/moorthi/gam.html (accessed 25 December 2018).

24. NOAA Operational Model Archive and Distribution System (NOMADS), available at: www.nomads.ncdc.noaa.gov (дата обращения: 01.02.2018). (accessed 01 February 2018).

25. Skamarock W.C. et al. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Techn. Note –475 + STR, June 2008. 125 p.

26. Wang, W., Bruyere, C., Duda, M. and Dudhia, J. (2017), *WRF-ARW Version 3 Modeling System User's Guide*. National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, USA.

Поступила в редакцию: 11.08.2019

Сведения об авторах

Сергей Владимирович Костарев

аспирант кафедры климатологии и мониторинга окружающей среды, Санкт-Петербургский государственный университет;
Россия, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7/9

e-mail: kostarevsergo@yandex.ru

Игорь Николаевич Русин

доктор географических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная Геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова»;
Россия, 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7

e-mail: inrusin2008@yandex.ru

About the authors

Sergey V. Kostarev

Postgraduate, Department of Climatology and Environmental Monitoring, Saint-Petersburg State University;
7/9, Universitetskaya emb., Saint Petersburg, 199034, Russia

Igor N. Rusin

Doctor of Geographic Sciences, Professor, Federal State Budgetary Institution «Main Geophysical Observatory»;
7, Karbyshev St., Saint-Petersburg, 199034, Russia

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Костарев С.В., Русин И.Н. Оценка качества численного прогноза температуры воздуха в зависимости от синоптической ситуации в Пермском крае // Географический вестник = Geographical bulletin. 2019. №3(50). С. 48–62 doi 10.17072/2079-7877-2019-3-48-62.

Please cite this article in English as:

Kostarev S.V., Rusin I.N. Quality assessment of the numerical temperature prediction depending on the synoptic situation in the Perm region // Geographical bulletin. 2019. №3(50). P. 48–62 doi 10.17072/2079-7877-2019-3-48-62.

УДК 551.51

DOI: 10.17072/2079-7877-2019-3-62-78

**ПРОСТРАНСТВЕННО–ВРЕМЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОСАДКОВ И ИХ
КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ВО ВНУТРЕННИХ
ОБЛАСТЯХ АЗИАТСКОГО КОНТИНЕНТА****Владимир Алексеевич Лобанов**

РИНЦ Author ID: 2290, SPIN-код: 7045-4156

e-mail: lobanov@EL6309.spb.edu

*Российский государственный гидрометеорологический университет,
Санкт-Петербург***Сапа Акмырадович Маммедов**

e-mail: sap9292@mail.ru

*Российский государственный гидрометеорологический университет,
Санкт-Петербург*

Внутренние области самого большого на Земле азиатского континента наименее всего обеспечены осадками, в связи с чем анализ их динамики в условиях современного изменения климата является актуальным. Цель проведенного исследования состояла в том, чтобы выявить наличие долговременных изменений средних значений в многолетних рядах осадков, обусловленных современным изменением климата. В качестве научной методологии исследования применялись известные статистические методы пространственно-временного анализа и моделирования временных рядов. В качестве рассматриваемых климатических характеристик выбраны многолетние ряды сумм осадков за каждый месяц года на 52 метеостанциях на территории Узбекистана, Туркменистана и Ирана. Сформирована региональная база данных по осадкам, оценена их однородность, в рядах восстановлены пропуски наблюдений, и сами ряды приведены к практически одинаковому многолетнему периоду продолжительностью в среднем в 110 лет. Выполнена классификация внутригодового распределения осадков с разделением их на влажный и сухой сезоны, установлена низкая пространственная связанность осадков, наблюдающаяся только до расстояний 90–170 км между пунктами наблюдений. Осуществлено статистическое моделирование временных рядов и определены закономерности пространственного распределения показателей стационарных и нестационарных моделей осадков. Выявлено, что в месяцы влажного периода года происходит в основном уменьшение осадков, а в месяцы сухого периода для эпизодически выпадающих осадков наблюдается их небольшое