

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-4-50-68>

УДК 551.509.313

Оценки влияния подстилающей поверхности на точность численного прогноза температуры воздуха на территории Беларуси с использованием модели WRF

С.А. Лысенко, П.О. Зайко

*Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь
lysenko.nature@gmail.com, Polly_LO@tut.by*

На основе современных баз данных дистанционного зондирования Земли GLASS (The Global Land Surface Satellite) и GLC2019 (Global Land Cover, 2019) проведена актуализация пространственной структуры землепользования и биофизических параметров подстилающей поверхности (альbedo, листового индекса и проективного покрытия) для территории Беларуси в мезомасштабной системе численного прогноза погоды WRF. Для ряда сложно прогнозируемых атмосферных ситуаций, наблюдавшихся в зимние периоды, выполнена серия численных экспериментов на основе модели WRF (Weather Research and Forecasting), инициализируемой расчетными данными глобальной системы метеорологических прогнозов GFS (Global Forecast System, NCEP). Показано, что использование в WRF данных о землепользовании высокого пространственного разрешения и учет распределения альbedo и листового индекса по территории Беларуси для каждого месяца позволяют сократить среднеквадратическую погрешность краткосрочного (до 48 ч) прогноза приземной температуры воздуха на 16–33 % относительно исходных прогнозов GFS. Среднеквадратическая погрешность прогноза температуры на метеорологических станциях Беларуси для заблаговременности +12, +24, +36 и +48 ч уменьшилась в среднем на 0,40 °C (19 %), 0,35 °C (10 %), 0,68 °C (23 %) и 0,56 °C (15 %) соответственно. Наиболее значимое уменьшение среднеквадратической погрешности численного прогноза температуры (до 2,1 °C) отмечено в дневное время суток (при сроках +12 и +36 ч), когда положительные обратные связи между альbedo и температурой подстилающей поверхности проявляются в наибольшей степени.

Ключевые слова: численный прогноз погоды, WRF, цифровая модель подстилающей поверхности, альbedo, листовой индекс, валидация прогностической модели

Estimates of the Earth surface influence on the accuracy of numerical prediction of air temperature in Belarus using the WRF model

S.A. Lysenko, P.O. Zaiko

*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences
of Belarus, Minsk, Belarus
lysenko.nature@gmail.com, Polly_LO@tut.by*

The spatial structure of land use and biophysical characteristics of land surface (albedo, leaf index, and vegetation cover) are updated using the GLASS (Global Land Surface Satellite) and GLC2019 (Global Land Cover, 2019) modern satellite databases for mesoscale numerical weather prediction with the WRF model for the territory of Belarus. The series of WRF-based numerical experiments was performed to verify the influence of the updated characteristics on the forecast quality for some difficult to predict winter cases. The model was initialized by the GFS (Global Forecast System, NCEP) global numerical weather prediction model. It is shown that the use of high-resolution land use data in the WRF and the consideration of the new albedo and leaf index distribution over the territory of Belarus can reduce the root-mean-square error (RMSE) of short-range (to 48 hours) forecasts of surface air temperature by 16–33% as compared to the GFS. The RMSE of the temperature forecast for the weather stations in Belarus for a forecast lead time of 12, 24, 36, and 48 hours decreased on average by 0.40°C (19%), 0.35°C (10%), 0.68°C (23%), and 0.56°C (15%), respectively. The most significant decrease in RMSE of the numerical forecast of temperature (up to 2.1 °C) was obtained for the daytime (for a lead time of 12 and 36 hours), when positive feedbacks between albedo and temperature of the land surface are manifested most.

Keywords: numerical weather prediction, WRF, digital land surface model, albedo, leaf area index, forecast model validation

Введение

Данные о пространственной структуре землепользования и физических характеристиках подстилающей поверхности являются важной и неотъемлемой частью численных моделей прогноза погоды. Категории землепользования и почвенно-растительного покрова входят в параметризации многих атмосферных процессов, связанных с пограничным слоем и переносом излучения в атмосфере (потоков коротковолновой и длинноволновой радиации, конвективных процессов, микрофизики влаги, турбулентности атмосферы, тепло- и влагообмена с подстилающей поверхностью) [1, 7].

В пределах каждого класса землепользования свойства подстилающей поверхности описываются рядом биофизических параметров: альbedo, излучательная способность, шероховатость, теплоемкость почвы, тепловая инерция поверхности, доступность почвенной влаги, листовой индекс, доля растительного покрова (проективное покрытие) и др. С использованием этих параметров можно с различной степенью сложности моделировать все процессы обмена излучением, теплом, влагой и импульсом между атмосферой и подстилающей поверхностью. В связи с этим отмеченные параметры подстилающей поверхности являются важнейшими для региональной привязки численных моделей прогноза погоды.

Быстрое изменение климата, наблюдаемое в последние десятилетия, а также воздействие ряда антропогенных факторов (урбанизация, мелиорация, хозяйственная деятельность) обуславливают необходимость периодического пересмотра и актуализации цифровых моделей пространственной структуры землепользования и биофизических характеристик

подстилающей поверхности в региональных системах численного прогнозирования погоды.

За последние два десятилетия на территории Беларуси произошли существенные изменения ландшафтов. Причинами этому послужили как различная хозяйственная деятельность (урбанизация, заболачивание, вырубка лесов и т. д.), так и климатические факторы. В качестве примера можно отметить изменение листового индекса на территории Беларуси за 2000–2020 гг. [2–4]. По данным спутникового спектрорадиометра MODIS статистически значимый рост листового индекса ($p = 0.05$) наблюдается на 25 % общей площади лесных массивов Беларуси, а на 11 % посевных площадей отмечается его статистически значимое понижение. В целом за период с 2000 по 2020 год листовой индекс лесов Беларуси увеличился почти на 8 %, а для земель сельскохозяйственного назначения листовой индекс снизился примерно на 5 %. Очевидно, что наблюдаемые изменения подстилающей поверхности в пределах территории Беларуси должны соответствующим образом учитываться при разработке численных прогнозов погоды.

Стоит отметить, что задаче уточнения и актуализации информации о подстилающей поверхности в мезомасштабных системах численного прогноза погоды в последние годы уделяется достаточно много внимания.

В [5] проведен численный эксперимент по оценке влияния типа землепользования на температурно-влажностный режим для территории Восточно-Европейской равнины. Результаты эксперимента продемонстрировали важную роль лесистости территории в распределении по ней ключевых метеорологических величин. Облесение территории привело к снижению температуры, увеличению осадков, росту влажности и повторяемости туманов; при обезлесении наблюдались обратные процессы – рост температуры и скорости ветра, уменьшение облачности и осадков.

В [13] оценена эффективность актуализации данных о землепользовании для точности мезомасштабной системы численного прогноза погоды WRF (Weather Research and Forecasting) применительно к территории северных провинций Китая. Рассматривался вариант замены устаревшего набора данных USGS (United States Geological Survey) на более современный и подробный (в части пространственного разрешения и количества учитываемых классов землепользования) аналог Европейского космического агентства – Global Land Cover (GLC2015) [11]. Показано, что при уточнении используемой в модели WRF классификации землепользования систематическая погрешность краткосрочного прогноза приземной температуры воздуха сокращается на 2,54 %, а систематическая погрешность скорости ветра – на 6,77 %.

Вопросы моделирования атмосферных процессов на мелиорированных и урбанизированных территориях подробно рассмотрены в [14]. Для моделирования процессов регулируемого орошения и урбанизации на заболоченных территориях использовалась система WRF. Результаты

численных экспериментов показали, что застройка водно-болотных угодий и пахотных земель значительно увеличивает региональную температуру и потоки явного тепла. Напротив, увеличение площади орошаемых земель в пригородной территории позволяет снизить температуру и увеличить поток скрытого тепла. Влияние типа землепользования на характер выпадения и количество осадков оказалось более сложным и неоднозначным: в сценарии урбанизации центры выпадения осадков сместились на восток от города, кроме того, наблюдался рост осадков в центральных районах города; при регулируемом орошении ранее заболоченных территорий осадки в основном выпадали в их центральной области, для юго-западных и северо-западных областей наблюдалось уменьшение количества осадков.

В [15] проанализировано влияние структуры землепользования, рельефа и количества почвенной влаги на точность прогноза конвективных осадков на основе модели WRF при разных пространственных разрешениях (3 и 12 км). Результаты численного моделирования мезомасштабных атмосферных процессов показали, что различные данные о землепользовании в значительной степени изменяют расчетные ветровые потоки в горных областях. Наибольший положительный эффект для точности прогноза конвективных осадков достигается при высоком пространственном разрешении данных о подстилающей поверхности.

Влияние данных о землепользовании на качество прогнозов WRF исследовалось также для района Жемчужной реки (Китай) в [16]. Замена стандартного для WRF набора данных о землепользовании на их более современный аналог оказало положительное влияние на точность прогноза приземной температуры, влажности воздуха и скорости ветра.

В настоящей работе для анализа влияния параметров подстилающей поверхности на точность краткосрочных прогнозов погоды для территории Беларуси также выбрана численная модель WRF, широко применяемая в национальных метеослужбах. Рассмотрена задача замены оригинальных для WRF наборов данных о подстилающей поверхности на более детальные и современные данные дистанционного зондирования Земли. Оценивается влияние произведенной замены на качество численных краткосрочных прогнозов приземной температуры воздуха для территории Беларуси.

Мезомасштабная система численного прогноза погоды WRF

Для численного моделирования мезомасштабных атмосферных процессов в системе WRF используются негидростатические уравнения для сжимаемой жидкости, интегрируемые на прямоугольной сетке методом конечных разностей. Аппроксимация прогностических уравнений выполняется с использованием стандартной конечно-разностной схемы Аракавы, а для интегрирования по времени применяется метод Рунге-Кутты [8].

Физические процессы подсеточного масштаба учитываются в WRF с использованием различных схем параметризации. К наиболее важным процессам подсеточного масштаба относятся процессы, связанные с микрофизикой влаги, потоками длинноволновой и коротковолновой радиации, тепло- и влагообменом в почве, конвекцией и турбулентностью в планетарном и пограничном слоях атмосферы. Помимо этого, в WRF реализован учет гравитационных волн, адвекции и других крупномасштабных физических процессов.

Система WRF включает блок подготовки данных WPS (WRF Preprocessing System), динамическое математическое ядро прогностической модели и систему ассимиляции данных WRFDA (WRF Data Assimilation). Для географической привязки модели используются цифровые базы топографических и биофизических характеристик подстилающей поверхности: рельеф, классы землепользования, индекс листовой поверхности, относительная площадь растительного покрова (проективное покрытие), альbedo и другие параметры, задающие специфику моделируемой области.

Кроме того, для прогностической модели WRF необходимы данные о начальном состоянии атмосферы, которые, как правило, поступают из глобальных или региональных моделей, а также данные о подстилающей поверхности, задающие граничные условия для моделируемой области. На данный момент в модели WRF доступны два базовых (оригинальных) набора данных о структуре землепользования:

1. USGS, подготовленный Геологической службой США. Основан на данных спутникового радиометра AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), охватывающих период с апреля 1992 по март 1993 года. Включает 24 класса землепользования, в том числе 3 городских. Максимальное доступное пространственное разрешение – 30".

2. MODIS, подготовленный Бостонским университетом на основе данных спутникового спектро радиометра MODIS за 2001–2004 гг. [9, 10]. Максимальное пространственное разрешение – 15". Данный набор содержит 20 классов землепользования.

Обновление цифровой модели подстилающей поверхности в системе WRF

С целью повышения точности численных прогнозов погоды для территории Беларуси подготовлены актуальные наборы данных о подстилающей поверхности с более высоким, чем в оригинальной версии WRF, пространственно-временным разрешением. Произведена замена цифровой модели пространственной структуры землепользования, параметров почвенно-растительного покрова и альbedo подстилающей поверхности, которые значительно изменились за последнее десятилетие.

Для обновления классов землепользования использовались данные Global Land Cover 2019 (GLC2019) [18], являющиеся результатом

обработки спутниковых наблюдений сканером высокого спектрального разрешения PROBA-V Европейского Космического Агентства. Набор данных GLC2019 содержит 23 класса землепользования с пространственным разрешением 100 м и в достаточной мере отражает современную пространственную структуру ландшафтов Беларуси.

Замена пространственной структуры землепользования производилась для расчетного домена WRF в пределах 40–60° с. ш., 16–43° в. д., включающего территорию Беларуси. Новые данные GLC2019 были переклассифицированы в категории землепользования USGS и преобразованы в проекции системы подготовки данных, используемые в WRF. В результате была получена обновленная цифровая модель классов землепользования в формате WPS Geogrid Binary.

О различиях в описании пространственной структуры землепользования с использованием оригинального и обновленного набора данных для WRF можно судить по рис. 1. Наиболее существенные отличия между двумя картами землепользования приурочены к поймам рек, пахотным землям и районам активных лесных вырубок. Кроме того, в обновленном наборе данных о землепользовании более широко представлены болотистые территории, а также массивы широколиственных и смешанных лесов. Общая площадь городских и застроенных земель в наборе GLC2019 увеличилась, что согласуется с результатами переписи населения Беларуси 2019 года.

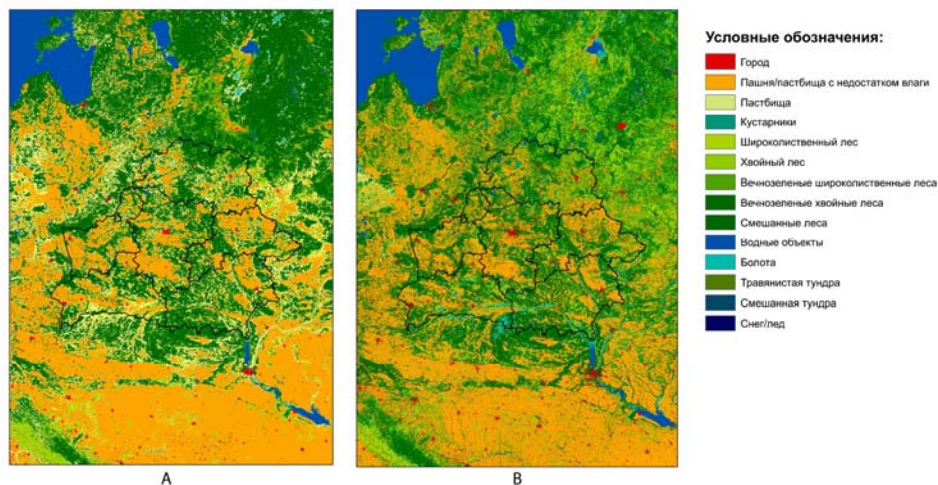


Рис. 1. Пространственная структура землепользования согласно классификации MODIS (стандартный набор данных для WRF) и Global Land Cover 2019 (обновленный набор данных для WRF).

Fig. 1. Land use spatial structure according MODIS classification (base WRF model dataset) and Global Land Cover 2019 (updated WRF model dataset).

Для обновления в WRF биофизических параметров подстилающей поверхности использовались продукты дистанционного зондирования Земли GLASS (The Global Land Surface Satellite) [19]. База данных GLASS включает 12 параметров подстилающей поверхности: альbedo и излучательную способность; листовой индекс, проективное покрытие, эвапотранспирацию и валовую первичную продукцию; температуру подстилающей поверхности; нисходящее коротковолновое, длинноволновое и фотосинтетически активное излучение; долю поглощаемой поверхностью фотосинтетически активной радиации и радиационный баланс. Все указанные параметры подстилающей поверхности за исключением температуры охватывают длительный период (1981–2019 гг.) и обладают достаточно высокими пространственным (от 1 км до 500 м) и временным (8 дней) разрешениями. Для периода 1981–1999 гг. в базе данных GLASS используются спутниковые данные AVHRR, а для более поздних лет – данные MODIS. По сравнению с другими открытыми базами данных дистанционного зондирования Земли, GLASS характеризуется более высоким качеством и точностью предоставляемых информационных продуктов [19].

Для доступа к данным GLASS использовалась облачная платформа Earth Engine, объединяющая множество доступных спутниковых данных и программные средства их обработки и анализа [12]. Данная платформа обеспечивает эффективный доступ к многочисленной геопространственной информации и устраняет технические барьеры, связанные с параллельной обработкой больших объемов данных.

Из базы данных GLASS выбраны три наиболее важных параметра подстилающей поверхности: сферическое альbedo, листовой индекс и проективное покрытие (относительная площадь растительного покрова). Эти параметры вычислялись отдельно для каждого месяца путем усреднения данных GLASS за 2000–2019 гг. Все остальные параметры, используемые для описания процессов энерго- и массообмена в пограничном слое атмосферы, рассчитываются в модели WRF на основе указанных трех параметров в зависимости от типа подстилающей поверхности [20].

Альbedo подстилающей поверхности для теплого периода года (май–сентябрь) рассчитывается на основе медианных значений альbedo для каждого месяца из базы данных GLASS. Для отдельных месяцев холодного периода года (октябрь–апрель) используются медианные значения альbedo снежного покрова и оголенной почвы. Среднее альbedo подстилающей поверхности в холодный период года рассчитывается с учетом ее снежного покрова на основе следующего выражения:

$$A(x, y) = A_s(x, y) \cdot \sigma_s(x, y) + [1 - \sigma_s(x, y)] A_0(x, y), \quad (1)$$

где x и y – координаты точки на земной поверхности; A_s и A_0 – альbedo снежного покрова и свободной от снега поверхности, в качестве которых

используются соответственно 90 и 5-й процентиля распределения альбедо для данной точки и данного месяца; σ_s – относительная площадь снежного покрова. Значение σ_s в каждой ячейке расчетной области задаются на основании данных глобальных численных моделей прогноза погоды и эмпирических соотношений между σ_s и высотой снежного покрова [20].

Описание численных экспериментов

Для оценки влияния модели подстилающей поверхности на точность численного прогноза состояния атмосферы проводилась серия численных экспериментов на основе прогностической модели WRF-ARW 4.3 при следующих характеристиках области моделирования:

– расчетный домен: 50–57° с. ш., 22–33° в. д., шаг пространственной дискретизации – 3 км (220×200 узлов), шаг интегрирования по времени – 18 сек;

– 33 вертикальных уровня до 5 гПа;

– параметризации подсеточных физических процессов: *микрофизика*;

– схема WRF Single-Moment 6-class, *пограничный слой* – схема Университета Ёнсе (Сеул, Корея) (YSU); *коротковолновая и длинноволновая радиация* – GFDL схема, прямой учет *конвекции*.

В качестве начальных и боковых граничных условий для прогностической модели WRF во всех численных экспериментах использовалась глобальная система метеорологических прогнозов GFS с шагом сетки 0,25°×0,25° [17]. Исходный срок моделирования состояния атмосферы – 00 ч ВСВ (Всемирное согласованное время), заблаговременность прогноза +48 ч с почасовыми выходными результатами. При выборе дат для эксперимента предпочтение отдавалось периодам действия зимних антициклонов, при которых фиксировались значительные отрицательные температуры, спрогнозированные с недостаточной точностью системой WRF и другими численными моделями (GFS, UKMO, COSMO).

Для каждой из рассматриваемых синоптических ситуаций проводилось два численных эксперимента: с оригинальными и обновленными наборами данных о подстилающей поверхности. В качестве базового варианта численного прогноза состояния атмосферы использовался прогноз на основе модели WRF с классами землепользования MODIS, так как данная конфигурация прогностической модели является основной в национальной метеорологической службе Беларуси (Белгидромет) и имеет достаточно длинный ряд прогнозов и верификаций (более 5 лет).

Предметом анализа было распределение по территории Беларуси температуры воздуха на высоте 2 м за сроки +12, +24, +36 и +48 ч от начала моделирования. Точность численного прогноза температуры оценивалась на основании сравнения расчетного поля температуры с данными наблюдений на 52 метеорологических станциях Беларуси. Для количественной оценки точности прогноза температуры использовалось четыре показателя [6]:

1. Средняя погрешность (Mean Error, *ME*):

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{Pi} - T_{\Phi i}), \quad (2)$$

3. Средняя абсолютная погрешность (Mean Absolute Error, *MAE*):

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |T_{Pi} - T_{\Phi i}|, \quad (3)$$

2. Мультипликативная систематическая погрешность (*BIAS*):

$$BIAS = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{Pi}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{\Phi i}}, \quad (4)$$

4. Среднеквадратическая погрешность (Root Mean Square Error, *RMSE*):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{Pi} - T_{\Phi i})^2}, \quad (5)$$

где N – количество метеорологических станций; $T_{\Phi i}$ и T_{Pi} – фактическое и прогнозное значение температуры на i -й станции. Прогнозные значения температуры (T_{Pi}) на метеостанциях вычислялись путем двумерной линейной интерполяции выходных сеточных данных WRF.

Результаты численных экспериментов

Наиболее существенное различие между исходной и обновленной цифровой моделью подстилающей поверхности состоит в учете пространственной структуры землепользования и альбедо. В связи с этим, наибольший интерес представляет сравнение результатов моделирования состояния атмосферы в зимний период, когда в наибольшей степени проявляются положительные обратные связи между альбедо и температурой подстилающей поверхности.

Сравнение пространственных распределений альбедо снежного покрова, рассчитанных на основе спутниковых продуктов MODIS и GLASS (рис. 2), показывает, что данные GLASS гораздо более адекватно воспроизводят распределение снежного покрова по территории Беларуси и лучше согласуются с пространственной структурой землепользования. На карте альбедо снежного покрова, построенной по данным MODIS (рис. 2а), присутствуют явные артефакты, которые, вероятно, связаны с коротким периодом, используемым для усреднения данных MODIS в системе WRF, а также с недостаточно хорошим соответствием цифровой модели почвенно-растительного покрова, используемой в оригинальной версии WRF, территории Беларуси. В обновленном комплекте данных для WRF, как видно из рис. 2б, подобные артефакты отсутствуют.

Результирующие (общие) альбедо подстилающей поверхности, рассчитанные при частичном снежном покрове с использованием данных

MODIS и GLASS, принципиально различаются как по абсолютной величине, так и по пространственному распределению (рис. 2в, г). Новая цифровая модель альbedo позволяет более корректно и детально воспроизвести пространственную структуру подстилающей поверхности, что имеет важное значение для расчетов ее радиационного и теплового баланса.

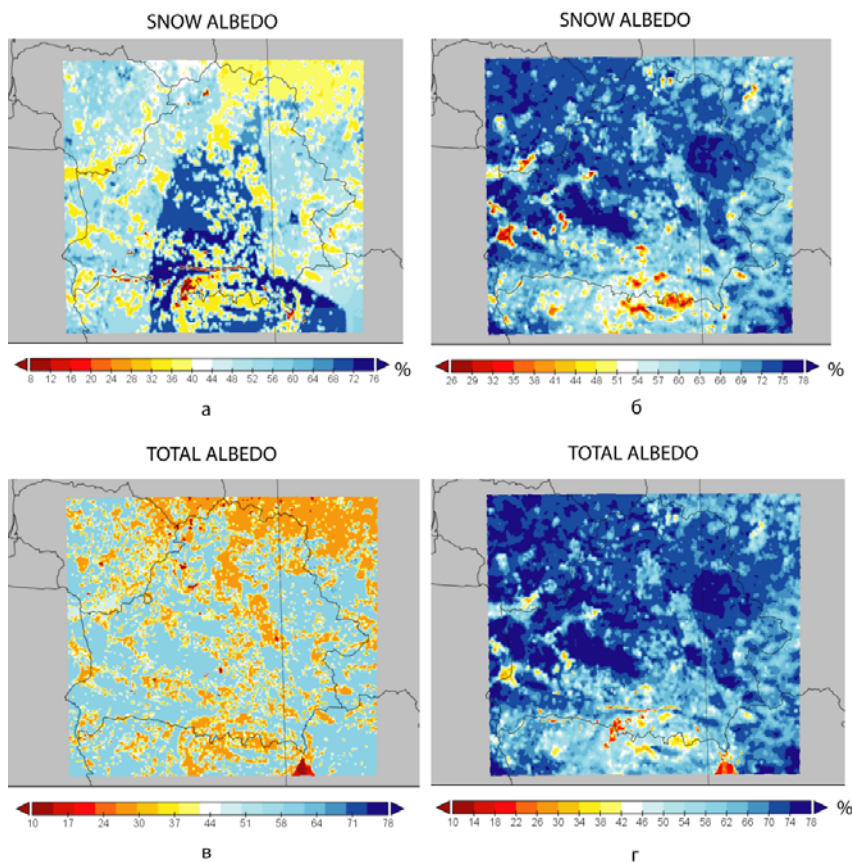


Рис. 2. Альbedo снежного покрова (а, б) и общее альbedo подстилающей поверхности (в, г) для 30.01.2021, рассчитанные на основе оригинальной (а, в) и обновленной (б, г) цифровой модели подстилающей поверхности для системы WRF.

Fig. 2. Calculated snow cover albedo (а, б) and the total surface albedo (в, г) based on original (а, в) and updated (б, г) digital surface model for WRF system, 30.01.2021.

В качестве примера, на рис. 3 представлены пространственные распределения разностного альbedo и турбулентных потоков явного (HFХ) и скрытого тепла (LH), рассчитанные на основе стандартной и обновленной модели WRF с заблаговременностью +36 ч на дату 30.01.2021 г.

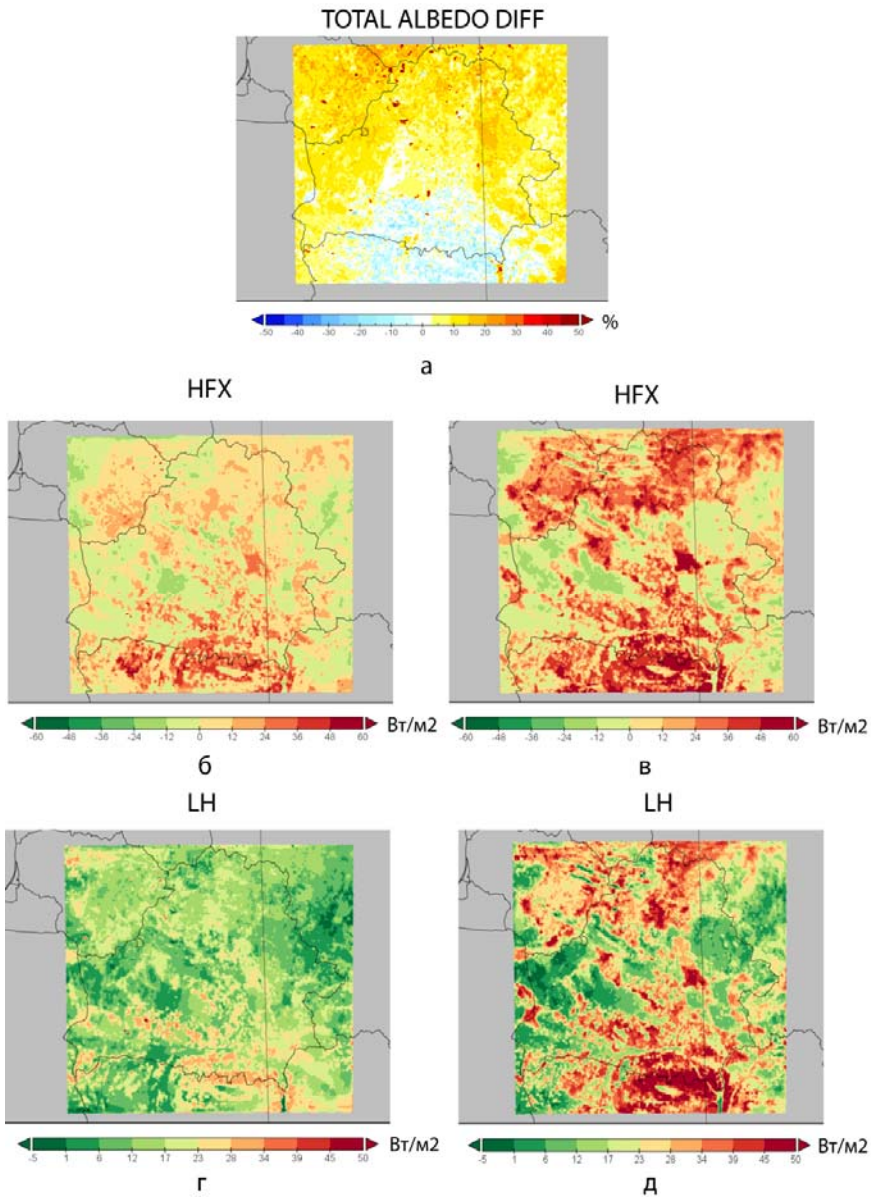


Рис. 3. Пространственное распределение разностного альбедо (а) между новой и стандартной для WRF цифровыми моделями подстилающей поверхности и соответствующие им пространственные распределения турбулентных потоков явного (б, в) и скрытого (г, д) тепла, спрогнозированные на дату 30.01.2021 г.

Fig. 3. Spatial distribution of albedo difference between updated and original digital surface models (а) and corresponding spatial distribution of turbulent fluxes of sensible (б, в) and latent (г, д) heat fluxes, 30.01.2021.

Наиболее существенные отличия расчетных тепловых потоков проявляются в южных регионах Беларуси, для которых рассматриваемые модели дают принципиально различные значения и пространственные распределения альбедо. Более низкие значения альбедо (рис. 3а), получаемые на основе нового набора данных для WRF, соответствуют более высоким потокам коротковолнового излучения, поглощаемого подстилающей поверхностью в дневные часы, и, как следствие, более высокой температуре подстилающей поверхности. За счет этого расчетные тепловые потоки с подстилающей поверхности в южных регионах Беларуси оказываются значительно выше аналогичных потоков, рассчитанных на основе стандартного набора данных для WRF (рис. 3б, г).

Зависимость потока скрытого тепла (LH) от биофизических параметров подстилающей поверхности более сложная. Сравнивая пространственные распределения потоков LH, рассчитанных на основе WRF (рис. 3г, д), с картами соответствующих им классов землепользования (рис. 1) можно сделать вывод, что различия в результатах расчета LH главным образом связаны с различиями в классификации типа подстилающей поверхности. Более распространенное присутствие в пространственной структуре подстилающей поверхности широколиственных и смешанных лесов, а также заболоченных территорий обуславливает большую величину суммарного испарения. В связи с этим потоки LH, рассчитанные на основе данных GLC2019, оказываются более высокими по сравнению с результатами их расчета на основе классификации землепользования MODIS.

Достаточно показательный пример, демонстрирующий важность корректного учета пространственной структуры и биофизических параметров подстилающей поверхности при численных прогнозах погоды, представлен на рис. 4. Карты численного прогноза температуры воздуха на высоте 2 м, полученные при двух используемых цифровых моделях подстилающей поверхности (ORIGINAL – стандартная для WRF, NEW – актуализированная на основе данных GLC2019 и GLASS), демонстрируют существенные различия. Цветными окружностями на картах обозначены значения температуры на метеорологических станциях Беларуси. Видно, что обновление цифровой модели подстилающей поверхности позволило уточнить фронтальные разделы на карте приземной температуры и обеспечило лучшее соответствие результатов численного моделирования данным метеорологических наблюдений. Среднеквадратическая погрешность прогноза температуры воздуха для дневных сроков +12 и +36 ч уменьшилась (в сравнении с прогнозом ORIGINAL) на 0,61 °C (23 %) и 1,76 °C (33 %) соответственно. Для срока +36 ч существенно сократилась мультипликативная систематическая погрешность (BIAS) – на 11 %, а коэффициент корреляции между предсказанными и наблюдаемыми значениями температуры воздуха увеличился с 0,62 до 0,75. Показатели точности прогноза температуры для остальных сроков прогноза

изменились менее существенно, однако остались не хуже аналогичных показателей базового прогноза ORIGINAL.

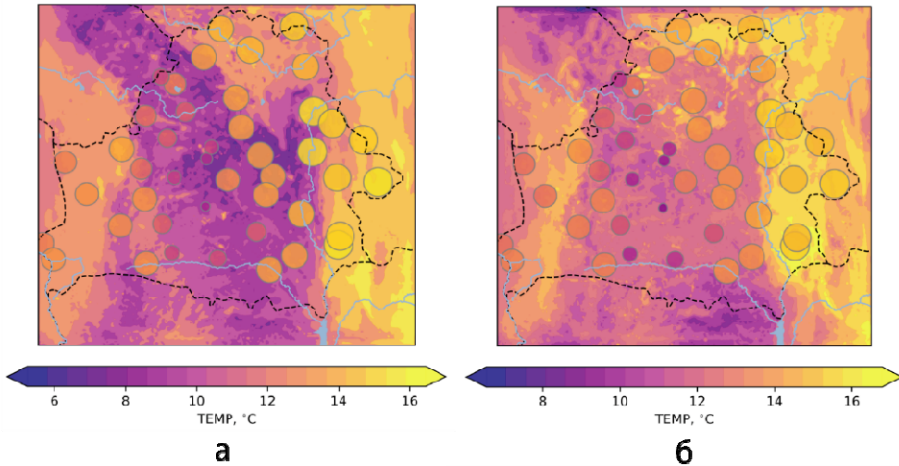


Рис. 4. Прогноз WRF для температуры воздуха с использованием цифровой модели подстилающей поверхности ORIGINAL (а), NEW (б). Окружностями разного диаметра и цвета показаны значения температуры на метеорологических станциях.

Fig. 4. Air temperature forecasts by WRF model based on digital surface model ORIGINAL (a), NEW (б). The temperature values at meteorological stations are presented as circles of different diameters.

Таким образом, использование одной и той же численной модели атмосферы при различном задании пространственной структуры землепользования и биофизических параметров подстилающей поверхности может приводить к существенным различиям в численных прогнозах радиационных, термических и конвективных процессов в пограничном слое атмосферы. Для статистических оценок изменений точности численных прогнозов погоды в результате актуализации информации о подстилающей поверхности в модели WRF прогнозные значения температуры для всех промоделированных ситуаций сопоставлены с данными наблюдений на метеорологических станциях (рис. 5). Актуализация цифровой базы данных с характеристиками подстилающей поверхности для территории Беларуси позволила сократить ошибки численного прогноза приземной температуры воздуха на уровне 2 м для зимнего периода при всех сроках прогнозирования: +12, +24, +36 и +48 ч. Наибольшее сокращение ошибок прогноза температуры наблюдается для дневного времени суток (сроки +12 и +36 ч), что, вероятно, связано с более активным проявлением в дневные часы положительных обратных связей между альбедо и температурой подстилающей поверхности в зимние месяцы. Более существенное повышение точности прогноза температуры для поздних сроков

(+36 и +48 ч) также имеет физическое объяснение с учетом быстрого «затухания» влияния начального состояния атмосферы и слабо изменяющимся со временем влиянием граничных условий на результаты моделирования эволюции атмосферных процессов.

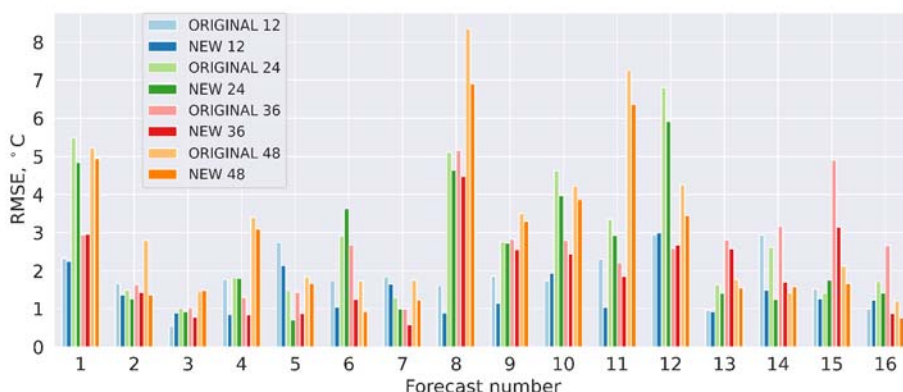


Рис. 5. Среднеквадратическая погрешность (RMSE) численного прогноза приземной температуры воздуха на территории Беларуси с заблаговременностью +12, +24, +36 и +48 ч для 16 промоделированных метеорологических ситуаций. ORIGINAL и NEW – прогнозы на основе модели WRF со стандартным и актуализированным комплектами данных о подстилающей поверхности соответственно.

Fig. 5. Air temperature root mean square error (RMSE) of numerical forecast in Belarus with lead time of +12, +24, +36 and +48 hours for 16 simulated weather cases. ORIGINAL and NEW – forecast based on original WRF surface model and based on updated digital surface model, respectively.

Средние показатели точности прогноза приземной температуры для смоделированных метеорологических ситуаций сведены в таблице. Видно, что за счет актуализации цифровой модели подстилающей поверхности достигается улучшение точности прогноза приземной температуры при всех сроках прогноза и по всем показателям, за исключением мультипликативной систематической погрешности (BIAS) при заблаговременности прогноза +12 ч.

Стоит отметить, что нередко возникающие достаточно большие погрешности численного прогноза WRF во многом связаны с неудовлетворительной точностью задания для прогностической модели WRF начальных и боковых условий на основе глобальной модели GFS. Расчетные данные этой модели даже при нулевом сроке могут иметь существенное расхождение с данными наблюдений, что, безусловно, сказывается на точности численного прогноза мезомасштабных атмосферных процессов. Среднеквадратические погрешности (RMSE) прогноза температуры воздуха для территории Беларуси с использованием глобальной модели GFS

при сроках +12, +24, +36 и +48 ч составляют 2,26, 3,63, 3,35 и 4,07 °C соответственно. Сравнивая эти величины с RMSE мезомасштабной прогно- стической модели WRF, приведенными в таблице, можно видеть, что мо- дель WRF в своей исходной конфигурации ORIGINAL хоть и обеспечивает повышение точности прогноза температуры (по сравнению с глобальной моделью GFS), но достигаемый при этом эффект, по край- ней мере для температуры воздуха в зимний период, незначителен: уменьшение RMSE для сроков +12, +24, +36 и +48 ч составляет 0,13 °C (6 %), 0,23 °C (6 %), 0,43 °C (13 %) и 0,27 °C (7 %) соответственно. актуа- лизация цифровой модели подстилающей поверхности для территории Беларуси позволяет достичь гораздо более существенного уменьшения среднеквадратической погрешности прогноза WRF для температуры воз- духа: 0,53 °C (23 %), 0,58 °C (16 %), 1,11 °C (33 %) и 0,83 °C (20 %) при сроках прогноза +12, +24, +36 и +48 ч соответственно.

Таблица. Статистические показатели точности прогноза приземной темпе- ратуры системой WRF со стандартными (ORIGINAL) и актуализированными (NEW) наборами данных о подстилающей поверхности

Table. Statistical indicators of surface air forecast accuracy by WRF model with original (ORIGINAL) and updated (NEW) surface datasets

Статистические показатели	Модель	Заблаговременность, ч			
		+12	+24	+36	+48
ME, °C	ORIGINAL	-1.62	-2.22	-2.46	-2.53
	NEW	-0.65	-1.50	-1.48	-1.55
BIAS	ORIGINAL	1.02	1.67	0.84	5.34
	NEW	1.05	1.19	1.04	5.09
MAE, °C	ORIGINAL	1.84	2.84	2.57	3.27
	NEW	1.44	2.51	1.94	2.76
RMSE, °C	ORIGINAL	2.13	3.40	2.92	3.80
	NEW	1.73	3.05	2.24	3.24

Заключение

Быстрое изменение климата, наблюдаемое в последние десятилетия, а также воздействие ряда антропогенных факторов (урбанизация, мелио- рация, хозяйственная деятельность) обуславливают необходимость пери- одического пересмотра и актуализации цифровых моделей простран- ственной структуры землепользования и биофизических характеристик подстилающей поверхности в мезомасштабных системах численного про- гноза погоды.

В настоящей работе была проведена актуализация наборов данных о подстилающей поверхности, используемых в мезомасштабной системе

численного прогноза погоды WRF. В результате региональной привязки WRF была уточнена пространственная структура землепользования и биофизические параметры подстилающей поверхности (альbedo, листовой индекс, проективное покрытие) для территории Беларуси.

Численные эксперименты по моделированию мезомасштабных атмосферных процессов на основе WRF для ряда синоптических ситуаций в зимний период выявили значимый положительный эффект актуализации цифровой модели подстилающей поверхности для точности численного прогноза приземной температуры воздуха. Модель WRF со стандартным набором данных о подстилающей поверхности (ORIGINAL) для рассмотренных случаев не обеспечила существенного повышения точности прогноза температуры по сравнению с прогнозами глобальной модели GFS, расчетные данные которой использовались в качестве начальных и боковых условий для WRF. Использование в WRF данных о землепользовании более высокого пространственного разрешения и учет пространственного распределения альbedo и листового индекса для каждого месяца позволили уточнить распределение турбулентных потоков скрытого и явного тепла с подстилающей поверхности и существенно уменьшить среднеквадратическую погрешность краткосрочного (до 48 ч) прогноза приземной температуры: на 16–33 % относительно исходных прогнозов GFS.

Сопоставление численных прогнозов приземной температуры с данными метеорологических наблюдений показало, что WRF с актуализированным набором данных о подстилающей поверхности (NEW) обеспечивает более качественный прогноз, особенно для сроков +12 и +36 ч (дневные часы). Среднеквадратическая погрешность прогноза приземной температуры для территории Беларуси в сравнении с прогнозом ORIGINAL при сроках +12, +24, +36 и +48 ч сокращается на величину до 1,5, 1,3, 2,1 и 1,4 °C соответственно. В среднем для рассмотренных случаев уменьшение среднеквадратической погрешности прогноза температуры при сроках +12, +24, +36 и +48 ч составило 0,40 °C (19 %), 0,35 °C (10 %), 0,68 °C (23 %) и 0,56 °C (15 %) соответственно.

Список литературы

1. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д. Численные прогнозы по негидростатическим моделям общего пользования WRF-ARW и WRFNMM // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада ЛТД, 2010. С. 94-135.
2. Логинов В.Ф., Лысенко С.А., Мельник В.И. Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования. Минск: Энциклопедикс, 2020. 217 с.
3. Логинов В.Ф., Лысенко С.А., Хомич В.С., Семенченко В.П., Кулак А.В., Степанович И.М. Признаки аридизации климата и их экосистемные проявления на территории Беларуси // Известия РАН. Серия географическая. 2021. Т. 85, № 4. С. 515-527.
4. Лысенко С.А. Климатообусловленные изменения биопродуктивности наземных экосистем Беларуси // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 6. С. 77-88.

5. Ольчев А.В., Розинкина И.А., Кузьмина Е.В., Никитин М.А., Ривин Г.С. Оценка влияния изменения лесистости центрального региона Восточно-Европейской равнины на летние погодные условия // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2017. Том 4. С. 79-101.

6. Определение набора параметров верификации рабочей версии программного-методического комплекса мезопрогнозирования атмосферных процессов: отчёт о выполн. работе (промежуточ.), 30.09.2013 / Отв. исполнитель И.А. Деменцова; Минск: Респ. Гидрометеорол. центр, 2013. 160 с. Инв. № 3799.

7. *Переведенцев Ю.П., Мохов И. И., Елисеев А. В.* Теория общей циркуляции атмосферферы. Казань: Казанский ун-т, 2013. С. 224.

8. *Skamarock W.C., Kleml J.B., Dudhia J., Gill D.O., Liu Z., Berner J., Wang W., Powers J.G., Duda M.G., Barker D.M. Huang X.-Y.* A description of the Advanced Research WRF Model Version 4 // NCAR Techn. Boulder: National Center for Atmospheric Research. 2021. 165 p.

9. *Barlage M., Zeng X., Wei H., Mitchell. K.* A Global 0.05 Maximum Albedo Dataset of Snow-covered Land Based on MODIS Observations // *Geophys. Res. Lett.* 2005. Vol. 32, no. 17. P. L17405. DOI 10.1029/2005GL022881.

10. *Broxton P.D., Zeng X., Sulla-Menashe D., Troch P. A.* A global land cover climatology using MODIS data // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2014. Vol. 53, is. 6. P. 1593-1605. DOI: 10.1175/JAMC-D-13-0270.1

11. *Buchhorn M., Smets B., Bertels, L., De Roo B., Lesiv M., Tsendbazar N. - E., Herold M., Fritz S.* Copernicus Global Land Service: Land Cover 100m: collection 3: epoch 2019: Globe 2020. DOI 10.5281/zenodo.3939050

12. *Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R.* Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // *Rem. Sens. Environ.* 2017. Vol. 202, is. 1. P. 18-27. DOI.org/10.1016/j.rse.2017.06.031

13. *Li H., Zhang H., Mamtimin A., Fan S., Ju C.* A New Land-Use Dataset for the Weather Research and Forecasting (WRF) Model // *Atmosphere*. 2020. Vol. 11, is. 4. P. 350.

14. *Li X., Mitra C., Dong L., Yang Q.*, Understanding land use change impacts on microclimate using Weather Research and Forecasting (WRF) Model // *Physics and Chemistry of the Earth*. 2017. DOI 10.1016/j.pce.2017.01.017.

15. *Knist S., Goergen K., Simmer C.* Effects of land surface inhomogeneity on convection-permitting WRF simulations over central Europe // *Meteorol. Atmos. Phys.* 2020. Vol. 132. P. 53-69. DOI 10.1007/s00703-019-00671-y

16. *Chang M., Fan S., Wang X.M.* Impact of refined land-cover data on WRF performance over the Pearl River Delta region, China // *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*. 2014. Vol. 50. P.645-655.

17. Global Forecast System (GFS). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>.

18. *Tsendbazar N., Tarko A., Li L., Herold M., Lesiv M., Fritz S., Maus V.* Copernicus Global Land Service: Land Cover 100m: version 3 Globe 2015-2019 // *Validation Report*. 2020. DOI 10.5281/zenodo.3606370

19. *Xiao Z.Q., Liang S., Wang J.D., Chen P., Yin X.J., Zhang L.Q., & Song, J.L.* Use of General Regression Neural Networks for Generating the GLASS Leaf Area Index Product From Time-Series MODIS Surface Reflectance // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2014. Vol. 52, is. 1. P. 209-223.

20. Niu G. Y., Yang Z. L., Mitchell K. E., Chen F., Ek M. B., Barlage M., Kumar A., Manning K., Niyogi D., Rosero E., Tewari M., Xia Y. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements // *J. Geophys. Res.* Vol. 116. D12109. DOI 10.1029/2010JD015139

References

1. Vel'tishchev N.F., Zhupanov V.D. Chislennyye prognozy po negidrosticheskim modelyam obshchego pol'zovaniya WRF-ARW i WRFNMM. *80 let Gidromettsentru Rossii*. Moscow: Triada LTD Publ., 2010, pp. 94-135 [in Russ.].

2. Lysenko S.A., Loginov V.F., Mel'nik V.I. *Izmenenie klimata Belarusi: prichiny, posledstviya, vozmozhnosti regulirovaniya*. Minsk: Entsiklopediks Publ., 2020, 217 p. [in Russ.].

3. Loginov V. F., Lysenko S. A., Khomich V. S., Semenchenko V. P., Kulak A. V., Stepanovich I. M. Climate Aridization Signs and Their Ecosystem Displays on the Territory of Belarus. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya. [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geography]*, 2021, vol. 85, no. 4, pp. 515-527 [in Russ.].

4. Lysenko S. A. Climate-Forced Changes of Bio-Productivity of Belorussian Terrestrial Ecosystems. *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Earth research from space]*, 2019, no. 6, pp. 78-88 [in Russ.].

5. Olchev A.V., Rozinkina I.A., Kuzmina E.V., Nikitin M.A., Rivin G.S. Assessing the influence of forest cover changes on summer weather conditions in the central part of the East-European Plain. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya [Fundamental and applied climatology]*, 2017, vol. 4, pp. 79-101 [in Russ.].

6. Opređenje nabora parametrov verifikatsii rabochey versii programno-metodicheskogo kompleksa mezoprognozirovaniya atmosferynh protsessov: otchyot o vypoln. rabote (promezhutoch.), 30.09.2013. Otv. ispolnitel' I.A. Dementsova Inv. № 3799. Minsk: Resp. Gidrometeorol. Tsentr Publ., 2013, 160 p. [in Russ.].

7. Perevedentsev Yu.P., Mokhov I.I., Eliseev A.V. *Theory of General Atmospheric Circulation: A textbook* / ed. by E.P. Naumov. Kazan: Kazan University Publ., 2013, 224 p. [in Russ.].

8. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Liu Z., Berner J., Wang W., Powers J.G., Duda M.G., Barker D.M. Huang X.-Y. *A description of the Advanced Research WRF Model Version 4*. NCAR Techn. Boulder: National Center for Atmospheric Research, 2021, 165 p.

9. Barlage M., Zeng X., Wei H., Mitchell. K. A Global 0.05 Maximum Albedo Dataset of Snow-covered Land Based on MODIS Observations. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, vol. 32, no. 17, pp. L17405. DOI: 10.1029/2005GL022881.

10. Broxton P.D., Zeng X., Sulla-Menashe D., Troch P. A. A global land cover climatology using MODIS data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2014, vol. 53, no. 6, pp. 1593-1605. DOI: 10.1175/JAMC-D-13-0270.1

11. Buchhorn M., Smets B., Bertels, L., De Roo B., Lesiv M., Tsendbazar N. - E., Herold M., Fritz S. Copernicus Global Land Service: Land Cover 100m: collection 3: epoch 2019: Globe 2020. DOI 10.5281/zenodo.3939050.

12. Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Rem. Sens. Environ.*, 2017, vol. 202, no. 1, pp. 18-27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.

13. Li H., Zhang H., Mamtimin A., Fan S., Ju C. A New Land-Use Dataset for the Weather Research and Forecasting (WRF) Model. *Atmosphere*, 2020, vol. 11, no. 4, 350 p.

14. Li X., Mitra C., Dong L., Yang Q., Understanding land use change impacts on microclimate using Weather Research and Forecasting (WRF) Model. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2017. DOI: 10.1016/j.pce.2017.01.017.

15. Knist S., Goergen K., Simmer C. Effects of land surface inhomogeneity on convection-permitting WRF simulations over central Europe. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 2020, vol. 132, pp. 53-69. DOI: 10.1007/s00703-019-00671-y.

16. Chang M., Fan S., Wang X.M. Impact of refined land-cover data on WRF performance over the Pearl River Delta region, China. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, vol. 50. pp. 645-655.

17. Global Forecast System (GFS). Available at: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>.

18. Tsendbazar N., Tarko A., Li L., Herold M., Lesiv M., Fritz S., Maus V. Copernicus Global Land Service: Land Cover 100m: version 3 Globe 2015-2019. *Validation Report*, 2020, DOI 10.5281/zenodo.3606370.

19. Xiao Z.Q., Liang S., Wang J.D., Chen P., Yin X.J., Zhang L.Q., & Song, J.L. Use of General Regression Neural Networks for Generating the GLASS Leaf Area Index Product From Time-Series MODIS Surface Reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, vol. 52, no. 1, pp. 209-223.

20. Niu G. Y., Yang Z. L., Mitchell K. E., Chen F., Ek M. B., Barlage M., Kumar A., Manning K., Niyogi D., Rosero E., Tewari M., Xia Y. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *J. Geophys. Res.*, vol. 116, p. D12109. DOI 10.1029/2010JD015139.

Поступила 20.06.2021; одобрена после рецензирования 30.11.2021;
принята в печать 13.12.2021.

Submitted 20.06.2021; approved after reviewing 30.11.2021;
accepted for publication 13.12.2021.