

Наталья В. Дорошко

Белорусский государственный университет, факультет географии и геоинформатики, ул. Ленинградская 16,
220030 Минск, Беларусь; e-mail: DrozhkoNV@bsu.by

Вопросы моделирования регионального климата на территории Беларуси

Dorożko N. W. **Problemy modelowania klimatu regionalnego na Białorusi.** Badana jest możliwość zastosowania mezoskalowego modelu numerycznego WRF jako wariantu regionalnego modelu klimatu. Proponowany jest wariant programu rozwoju regionalnego modelu klimatu opartego na systemie WRF. Oceniana jest zależność wyników obliczeń i wyznaczania regionalnych parametrów klimatycznych od jakości zastosowanego modelu globalnego i modelowania mezoskalowego parametrów zachmurzenia.

Dorozhko N. V. **Issues of modeling the regional climate in Belarus.** The possibility of using the mesoscale numerical model of WRF as a variant of the regional climate model is investigated. A variant of the scheme for developing a regional climate model based on the WRF system is proposed. The dependence of the results of calculation and determination of regional climatic parameters on the quality of the global model used and mesoscale modeling of cloud parameters is assessed.

Ключевые слова: моделирование, региональный климат, палеоклимат, мезомасштабная модель, регион

Słowa kluczowe: modelowanie, klimat regionalny, paleoklimat, model mezoskalowy, region

Key words: modeling, regional climate, palaeoclimate, mesoscale model, region

Аннотация

Исследована возможность использования мезомасштабной численной модели WRF в качестве варианта региональной климатической модели. Предложен вариант схемы разработки региональной климатической модели на базе системы WRF. Проведена оценка зависимости результатов расчета и определения региональных климатических параметров от качества используемой глобальной модели и мезомасштабного моделирования параметров облачности.

Введение

Вопрос глобального климата, а также его изменений вызывает большой интерес научного сообщества, и активно исследуется (Дымников, Филатов, 1994; Дымников и др., 2005; HOUGHTON и др., 2001; ВОЛОДИН, ДИАНСКИЙ, 2019). Это обусловлено тем, что изменения,

происходящие в климатической системе Земли, неизбежно повлекут за собой изменения всех компонентов ее географической оболочки, включая состояние биосферы и процессов жизнедеятельности человека.

Проблемы климата и, в частности, палеоклимата, долгое время привлекали внимание геологов, биологов и климатологов, но только сравнительно недавно стали рассматриваться как предмет исследования, к которому можно применить методы численного моделирования (BROCCOLI, 2014).

Главным современным средством изучения климатической (палеоклиматической) системы является численное моделирование происходящих в ней физических и химических процессов с помощью глобальных и региональных моделей.

В настоящее время численные климатические модели используют для различных целей: от изучения динамики самой климати-

ческой системы (как в настоящем, так и в прошлом) до прогнозов будущего климата и учета влияния антропогенного фактора.

Важным аспектом применения численных моделей является то, что они позволяют, с одной стороны, поставить исследование климатических процессов на серьезную научную основу, а с другой стороны, ускорить расчет климатических параметров и повысить точность предсказания их изменений (ДЫМНИКОВ и др., 2005).

Детальное изучение климата прошлых геологических эпох создает перспективу для реконструкции условий палеосреды и анализа процессов ее изменения.

По современным представлениям климатическая система есть система, объединяющая атмосферу, океан, криосферу и биоту. Эта система характеризуется конечным множеством параметров (компоненты скорости ветра и течений в океане, температура и солёность, водяной пар, концентрация газовых составляющих, плотность, давление и др.), находящихся в сложном взаимодействии.

Математически понятие „климат“ определяется как статистический ансамбль состояний, принимаемых климатической системой за достаточно большой промежуток времени (ДЫМНИКОВ, ФИЛАТОВ, 1994; ДЫМНИКОВ и др., 2005; HOUGHTON и др., 2001).

Главной методологической основой решения основных климатических задач являются глобальные модели общей циркуляции атмосферы и океана.

Наряду с глобальными задачами важный научный и практический аспект представляет анализ региональных проявлений изменения глобального климата, а также выделение и оценка возможного влияния региональных особенностей на климат в глобальном масштабе.

Это обуславливает возрастающий интерес к развитию региональных климатических моделей, позволяющих наиболее адекватно учесть особенности отдельных территорий.

В настоящее время в мировой практике используется достаточно широкий класс совместных климатических моделей. Наиболее известные из них такие, как модель Нацио-

нального центра атмосферных исследований США (BOVILLE, GENT, 1998), модель Макса Планка института метеорологии Гамбургского университета (ROECKNER и др., 1992), а также модели Института вычислительной математики РАН (АЛЕКСЕЕВ и др., 1998) и Главной геофизической обсерватории (ШНЕЕРОВ и др., 1997).

Глобальные модели общей циркуляции используются для моделирования климата, исследований влияния внешних факторов на климатические вариации на различных временных масштабах, для изучения обратного влияния на атмосферу подстилающей поверхности, покрытой льдами, растительностью и т. п. (KRUPCHATNIKOFF, KUZIN, 2005). Тем не менее, они имеют ряд ограничений своей применимости, связанные с недостаточностью разрешения региональных особенностей.

Глобальные модели общей циркуляции используются для моделирования климата, исследований влияния внешних факторов на климатические вариации на различных временных масштабах, для изучения обратного влияния на атмосферу подстилающей поверхности, покрытой льдами, растительностью и т. п. (KRUPCHATNIKOFF, KUZIN, 2005). Тем не менее, они имеют ряд ограничений своей применимости, связанные с недостаточностью разрешения региональных особенностей.

Одним из подходов, который позволяет обойти эти трудности и является моделирование регионального климата.

Пространственное разрешение в региональных моделях климата увеличивается так, чтобы можно было явно описать мезомасштабные явления, которые обусловлены, в том числе и мезомасштабными особенностями подстилающей поверхности региона.

На боковых границах в качестве краевых условий используются либо результаты глобального анализа наблюдений, либо данные численного моделирования общей циркуляции атмосферы (ФОМЕНКО, KRUPCHATNIKOV, 1993; KRUPCHATNIKOFF, 1998).

В настоящей работе исследуются возможности использования в качестве варианта системы численного моделирования регионального климата на территории Беларуси мезо-

масштабной системы WRF (Weather Research and Forecasting) (*National Center...*, 2009).

Основная цель работы – проанализировать принципиальную возможность и эффективность компьютерного моделирования основных климатических (палеоклиматических) параметров в данном регионе.

Важным являлась также разработка процессов валидации региональной климатической модели, а также определение ее чувствительности к малым внешним воздействиям.

Материалы и методы

Материалами для работы служили данные системы GFS (NOAA, 2014) и реанализа с сайта NOAA (<https://www.esrl.noaa.gov>, 2014), база стационарных геофизических данных модели WRF, результаты численного моделирования в системе WRF (из архива НИИЦ МО БГУ), данные орбитальных наблюдений, результаты обработки палеоклиматограмм ископаемой герпетофауны эпохи голоцена на территории Беларуси.

Использованы методы численного моделирования атмосферных процессов в мезомасштабной системе WRF, статистической обработки данных посредством пакетов origin 2018 и excel 2019.

Использованы также методы визуализации и анализа в командном языке NCAR(NCL) (NCAR, 2014).

Численное моделирование проводилось в системе WRF 3.9.1 (*National Center...*, 2009) с использованием 32-ядерного суперкомпьютера BEVALEX.

Результаты и их обсуждение

Примерная схема разрабатываемой модели для численного моделирования регионального палеоклимата на территории Беларуси представлена на рис. 1.

В соответствии с задачами настоящей работы для упрощения расчетов в качестве климатической „Численной модели глобальной атмосферы и океана“ (рис. 1) использовались данные реанализа NOAA и глобальной мо-

дели атмосферы GFS. Для формирования начальных и граничных условий использовались данные с интервалом 6 ч и пространственным разрешением 0,5 и 0,25°.

В качестве рабочей области региональной циркуляционной модели для проведения численных экспериментов использовались домены 100 x 100÷700 x 700 точек мезомасштабной модели WRF с различным пространственным разрешением (1÷50 км) и 35 уровнями давления в диапазоне (1÷1 000 ГПа).

В ходе проведения расчетов на данном этапе основное внимание было сосредоточено на исследовании зависимости результатов мезомасштабных расчетов (региональная модель) от погрешностей входных данных (глобальная модель, а также валидации результатов расчета по данным орбитальных наблюдений).

Для комплексной оценки зависимости результатов региональной модели циркуляции от погрешностей глобальной модели было проведено сравнение результатов расчета с использованием реального обновления метеоданных и прогнозного расчета глобальной модели GFS на период до 10 суток.

Сравнивались данные расчета различных параметров (облачности, поверхностной температуры, температуры воздуха на уровне 2 м, вертикальных профилей температуры и т.д.). Фактические и прогнозные расчеты WRF были сделаны с одинаковыми наборами параметров расчета.

В качестве примера на рис. 2 и 3 приведен результат расчетов для случая, зарегистрированного на территории Беларуси 6 мая 2014 г.

Приведены карты разности значений функции dBZ_Refl, характеризующей рассеяния сигнала метеорадара облачностью и поверхностной температуры. По результатам видно, что для данного случая в ночное время (1 час ночи) расхождений практически нет по всей территории, только величина температуры колеблется на доли градусов. Расхождения более заметны в дневное время, максимальная разница температур составляет 5°С в районах, занятых облачностью.

Алгоритм численного моделирования регионального палеоклимата Беларуси в периоды эпохи голоцена

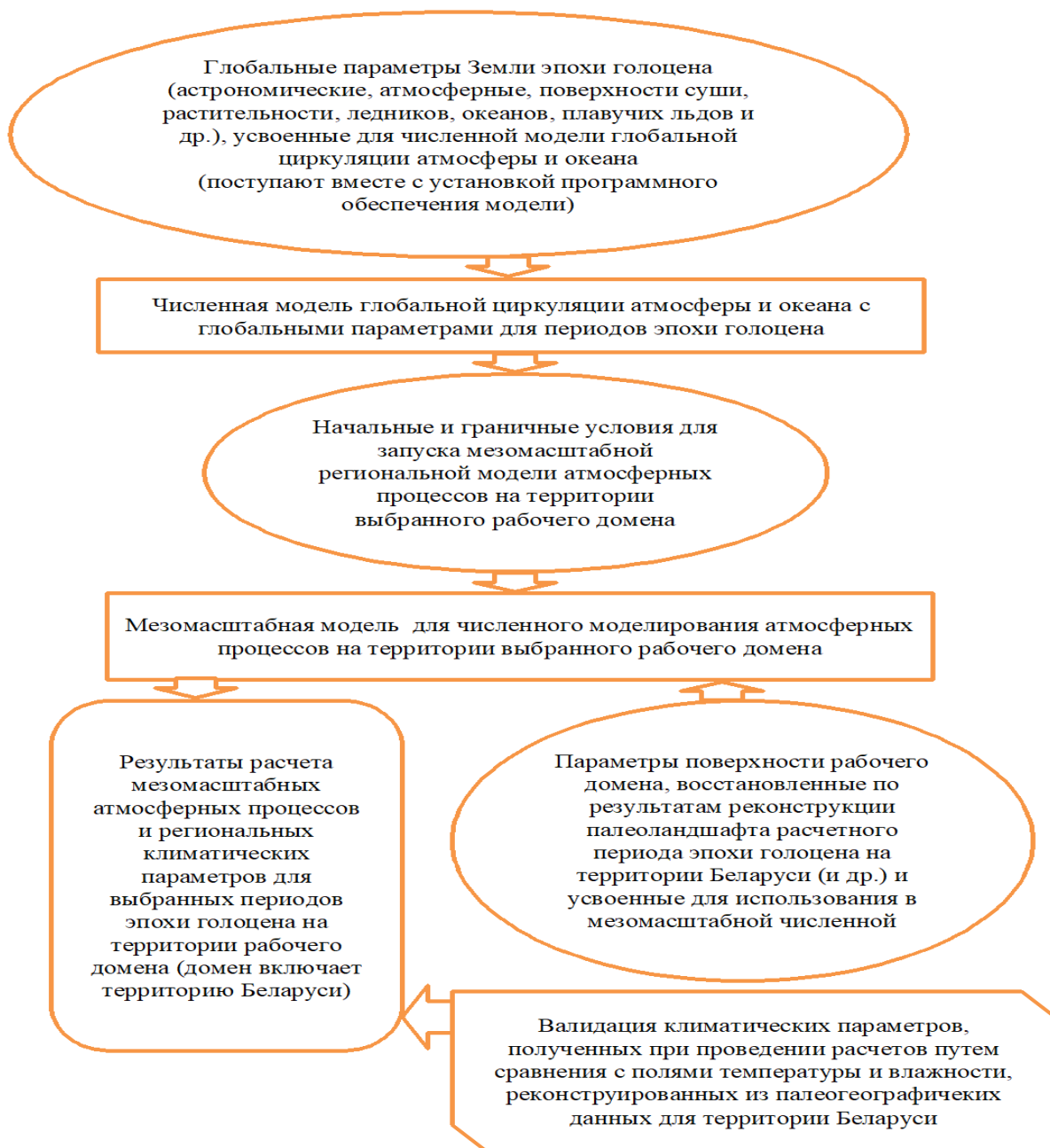


Рис. 1, Примерный алгоритм численного моделирования палеоклимата на территории Беларуси

Rys. 1. Przykładowy algorytm numerycznego modelowania paleoklimatu na Białorusi

Fig. 1. An example algorithm for numerical modeling of the palaeoclimate in Belarus

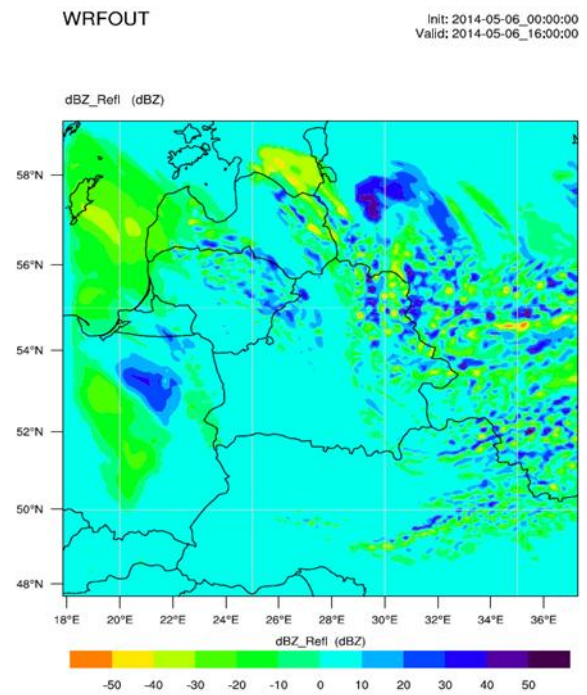
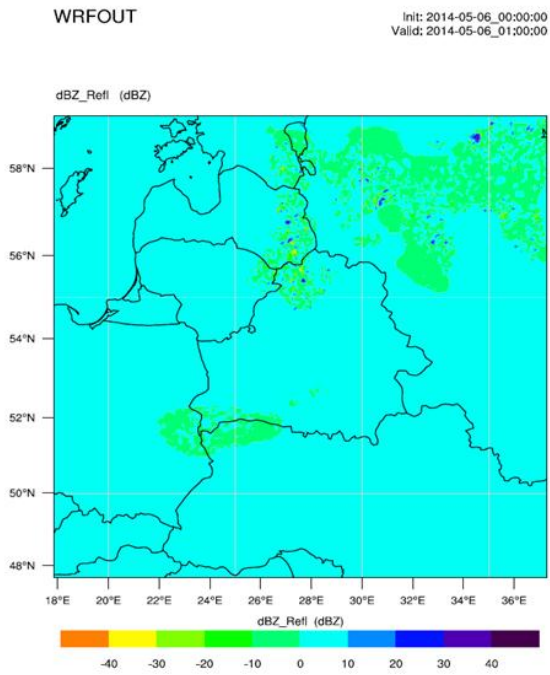


Рис. 2. Карты разности значений функции отражения сигнала радара облачностью, dBZ_Refl (прогноз – метео). За 1 час (слева) и за 6 часов (справа)

Rys. 2. Mapy różnicy wartości funkcji odbicia sygnału radaru przez chmurę, dBZ_Refl (prognoza – meteo). W ciągu 1 godziny (po lewej) i 6 godzin (po prawej)

Fig. 2. Maps of the difference in the values of the reflection function of the radar signal by cloud, dBZ_Refl (forecast – meteo). For 1 hour (left) and 6 hours (right)

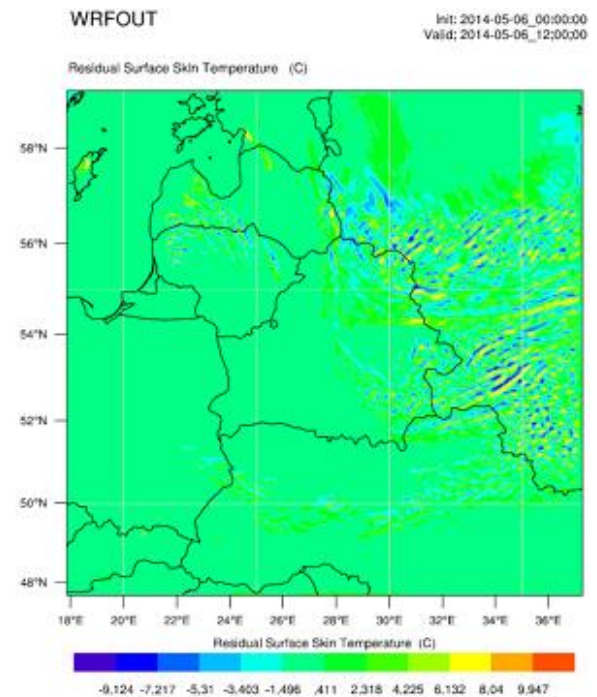
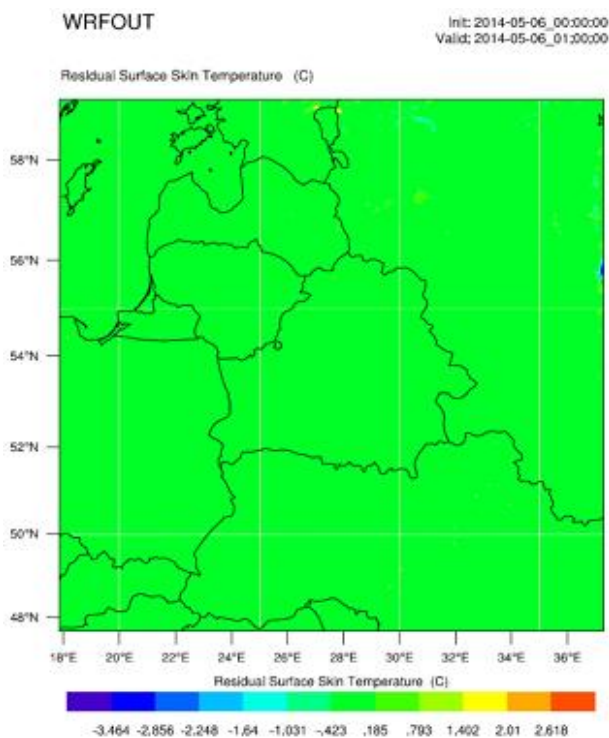


Рис. 3. Карты разности значений поверхностной температуры, Tsk (прогноз – метео). За 1 час (слева) за 12 часов (справа)

Rys. 3. Mapy różnicy temperatur powierzchni, Tsk (prognoza – meteo): 1 godzina (po lewej) 12 godzin (po prawej)

Fig. 3. Maps of the difference in surface temperature, Tsk (forecast – meteo): 1 hour (left) 12 hours (right)

Следует отметить, что максимальная точность с минимальными погрешностями характерна для ночного периода суток, когда погода более устойчива, т. е. когда замедляются или полностью отсутствуют конвективные процессы.

Полученный результат особенно важно учитывать при использовании в качестве входных и граничных условий данных глобальной циркуляции в климатической модели со значительными временными и пространственными интервалами.

Результаты проведенных расчетов различных случаев погодных ситуаций показали необходимость для получения усредненных по данному региону климатических значений температур и осадков как можно более качественного воспроизведения облачности.

Для валидации численного моделирования облачного покрова предпринята попытка сопоставления параметров расчетной облачности с данными орбитальных наблюдений. Результат сравнения для ситуации циклона (урагана) над восточной Европой 14.08.2012 г. представлен на рис. 4–7.



Рис. 4. Спутниковый снимок 14.08.2012 с сервиса GIBS
Rys. 4. Zdjęcie satelitarne 14.08.2012 z serwisu GIBS
Fig. 4. Satellite image 14.08.2012 from the GIBS service

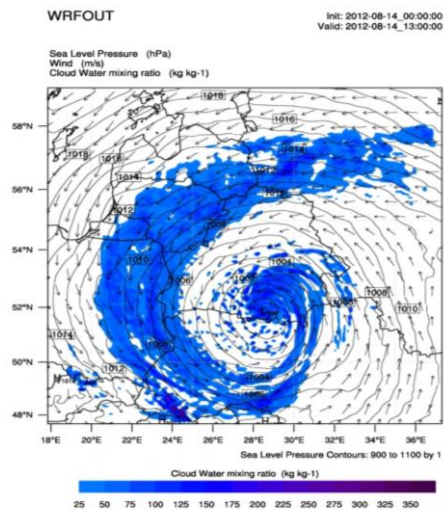


Рис. 5. Расчёт облачности в системе WRF
Rys. 5. Przetwarzanie w chmurze w systemie WRF
Fig. 5. Cloud computing in the WRF system

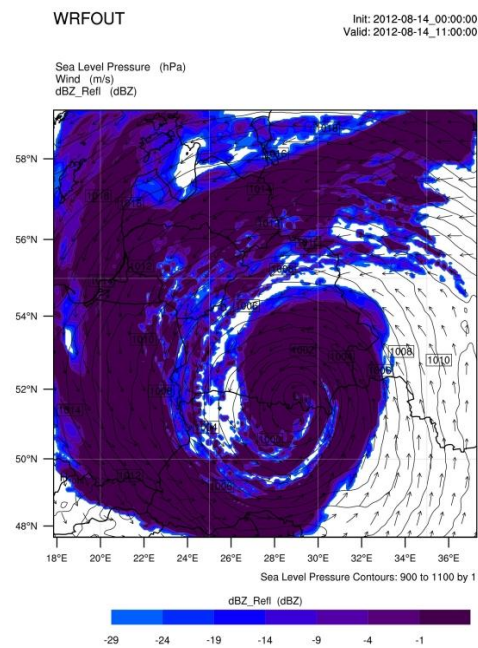


Рис. 6. Расчёт отражательного фактора радарного сигнала dbZ (14.08.2012)
Rys. 6. Obliczanie współczynnika odbicia sygnału radarowego dbZ (14.08.2012)
Fig. 6. Calculation of the reflective factor of the radar signal dbZ (14.08.2012)

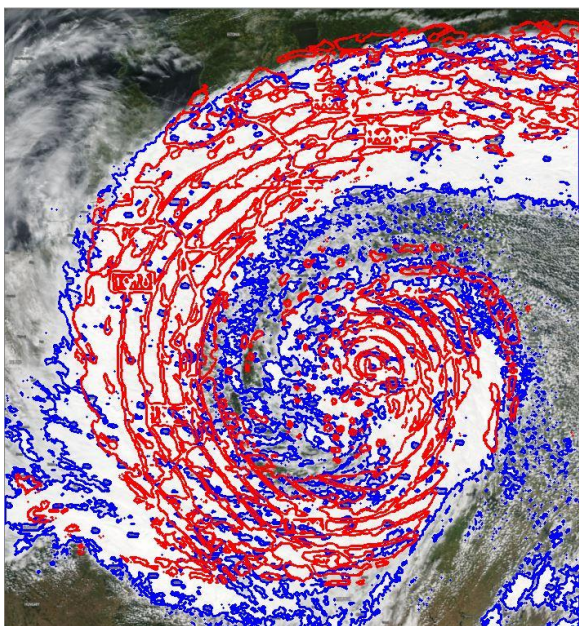


Рис. 7. Выделение и наложение контуров для ячеек облачности данные спутника (синий) и расчет WRF (красный)

Rys. 7. Wydzielenie i zaznaczenie komórek chmurowych z danych satelitarnych (niebieski) i obliczenia WRF (czerwony)

Fig. 7. Isolation and contouring for cloud cells satellite data (blue) and WRF calculation (red)

Спутниковые снимки облачности на выбранную дату были получены с сервиса NASA Global Imagery Browse Services Available Imagery Products с разрешением 500 м на 1 пиксель.

Как видно из рис. 4–7, при правильном выборе масштаба с соответствующей моделью подсеточной параметризации система WRF позволяет достаточно адекватно моделировать сложные случаи облачности, способные существенно повлиять на параметры расчета.

Особенно это относится к моделированию среднеклиматических региональных параметров, усредненных по пространству домена и длительным временным интервалам, которые при неадекватных параметрах расчета могут привести к накоплению ошибки и заметно исказить полученный результат.

В качестве дополнительных параметров валидации региональной палеомодели в схеме на рис. 1 предложено использовать данные реконструкции усредненных по геологическим и климатическим периодам предельные (лето – зима) значения среднегодовых темпера-

тур и осадков. При этом необходимо отметить, что проведенные нами тестовые расчеты суммарных осадков для конкретных пунктов и областей на территории Беларуси за различные временные периоды дают результат с точностью 1%.

Тем не менее, вопрос получения из результатов расчета климатических параметров пригодных для сопоставления с результатами палинографических и др. палеоклиматических реконструкций требует проведения дополнительных специальных исследований.

Заключение

1. Представляется возможным использовать мезомасштабные численные модели WRF в качестве варианта региональной климатической модели.
2. Разработан вариант схемы региональной климатической модели на базе системы WRF.
3. Результаты расчета зависят от качества моделирования параметров облачности в мезомасштабной численной модели и это необходимо учитывать при расчете и моделировании климата как в будущем, так и в прошлом.

Литература

- Алексеев В. А., Володин Е. М., Галин В. Я., Дымников В. П., Лыкосов В. Н., 1998: Моделирование современного климата с помощью атмосферной модели ИВМ РАН. Описание модели A5421 версии 1997 года и результатов эксперимента по программе АМІР II. ИВМ РАН, Москва: 121 с.
- Володин Е. М., Дианский Н. А., 2019: Моделирование изменений климата в 20–22 столетиях с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана. Известия РАН, Физика атмосферы и океана (в печати).
- Дымников В. П., Филатов А. Н., 1994: Основы математической теории климата. ВИНТИ, Москва: 252 с.
- Дымников В. П., Лыкосов В. Н., Володин Е. М., Галин В. Я., Глазунов А. В., Грицун А. С., Дианский Н. А., Толстых М. А., Чавро А. И., 2005: Моделирование климата и его измене-

- ний. В: Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования, т. 2. Наука, Москва: 38–175.
- Шнееров Б. Е., Мелешко В. П., Соколов А. П. и др., 1997: Моделирование регионального климата. Труды ГГО, 544: 3–123.
- Boville B. A., Gent P. R., 1998: The NCAR climate system model, version one. *Climate*, 11: 1115–1130.
- Broccoli A. J., 2014: Paleoclimate Modelling of Last Glacial Maximum GSM. In: Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences: 20509–24525.
- Fomenko A. A., Krupchatnikov V. N., 1993: A finite-difference model of the atmospheric dynamics with the conservation laws. *Bulletin of the Novosibirsk Computing Center, Numerical Modeling in Atmosphere, Ocean and Environment Studies*, 1: 17–31.
- Houghton J. T., Ding Y., Griggs D. J et al. (eds.), 2001: *Climate Change 2001. The Scientific Basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: 881 p.
- Krupchatnikoff V., 1998: *J. Num. Anal. and Math. Modelling/ 1998. V.13., № 6: 479–492.*
- Krupchatnikoff V. N., Kuzin V. I., 2005: Numerical simulation of climate problems. UNESCO, EOLSS Publishers Co Ltd, part 6.4.5.3: 25 p.
- National Center of Atmospheric Research. WRF - ARV Version 3 Modeling Systems: User's Guide. USA, 2009: 280 p.
- NCAR Command Language (NCL) Libraries [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.ncl.ucar.edu/> – Date of access: 07.08.2014.
- NOAA National Operational Model Archive & Distribution System (NOMADS) Model Data Access Page [Electronic resource]. – Mode of access: <http://nomads.ncdc.noaa.gov/data.php> – Date of access: 07.08.2014.
- Roeckner E., Arpe K., Bengtsson L. et al. (eds.), 1992: Simulation of the present-day climate with the ECHAM model: Impact of model physics and resolution. Report, 93. Max-Planck-Institut fur Meteorologie, Hamburg: 175 p.
- <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.nmc.reanalysis.html>

Поступила в редакцию: 20 сентября 2019

Wpłynął do redakcji: 20 września 2019

Received: 20 September 2019