

УДК 551.577.21

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ОСАДКОВ НАД СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКОЙ И ВЛИЯНИЯ ГИДРОСТАТИЧЕСКОЙ АППРОКСИМАЦИИ В АТМОСФЕРНОЙ МОДЕЛИ WRF-ARW

© 2017 г. А. В. Гавриков

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия**e-mail: gavr@sail.msk.ru*

Поступила в редакцию 26.09.2016 г.

При помощи модели WRF (Weather Research and Forecast model) с исследовательским ядром ARW (Advanced Research WRF) производится высокоразрешающее (15 км) моделирование атмосферы над территорией Северной Атлантики в зимний (январь 2016 г.) и летний (июль 2015 г.) периоды. Оценка качества воспроизведения осадков проводится по данным дистанционного зондирования GPM (Global Precipitation Measurement) и атмосферного реанализа ERA-Interim. Дополнительно исследуется влияние на точность воспроизведения осадков полного и гидростатического вида уравнения для вертикальной скорости. Показано, что модель в указанной конфигурации удовлетворительно воспроизводит поле осадков. Влияния гидростатической аппроксимации (на вычислительной области с разрешением 15 км, простой топографией и при включенных параметризациях конвекции и микрофизики) не выявлено.

DOI: 10.7868/S0030157417020046

ВВЕДЕНИЕ

Стандартным методом наблюдения за осадками на гидрометеорологических постах является измерение объема выпавшей воды за прошедший синоптический срок [3]. Дискретный характер осадков требует высокой плотности наблюдательных постов, что на данный момент является невыполнимым требованием. Получение данных об осадках над океаном стало возможным в последние десятилетия благодаря развитию дистанционного зондирования. Наиболее подходящим для исследования внетропических регионов являются данные проекта GPM (Global Precipitation Measurement) [6], которые доступны только с 2014 г. Недосток натуральных наблюдений можно компенсировать при помощи численного моделирования. В первую очередь следует отметить данные глобальных реанализов, также используется продукция региональных мезомасштабных моделей. Все эти источники обладают определенным набором достоинств и недостатков.

Современные вычислительные мощности не позволяют воспроизводить осадки в явном виде, поэтому для всех моделей атмосферы эта характеристика является продуктом параметризации. Для осадков существует большое количество схем параметризаций различной сложности, однако их качество снижается при снижении пространственного разрешения. Этим объясняется неудов-

летворительное согласование всех глобальных реанализов (где разрешение в среднем составляет около 1°) с данными наблюдений. Дополнительным ограничением реанализов может служить упрощенный математический аппарат, поскольку для экономии вычислительных ресурсов все современные глобальные реанализы получены с использованием гидростатических моделей. Гидростатическая аппроксимация справедлива при достаточно большом масштабе горизонтального осреднения (10^2 км), однако отсутствие полного уравнения для вертикальной скорости ставит под вопрос качество воспроизведения осадков. Использование региональной негидростатической модели высокого разрешения позволяет улучшить согласование с наблюдениями. В этих моделях также используются параметризации подсеточных процессов, однако на этапе планирования численного эксперимента (конфигурации) есть возможность существенно повысить разрешение вычислительной области и воспользоваться оптимальным для решаемой задачи набором схем.

В настоящей работе, на основе сравнения результатов различных численных экспериментов при помощи модели WRF (Weather Research and Forecast model) с данными наблюдений GPM и реанализом ERA-Interim, делается вывод о достоверности воспроизведения осадков в мезомасштабной модели, а также о влиянии гидростати-

ческой аппроксимации на качество воспроизведения осадков над территорией Северной Атлантики в зимний (январь 2016 г.) и летний (июль 2015 г.) периоды.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Численная модель атмосферы WRF с исследовательским ядром ARW (Advanced Research WRF) разработана в Национальном центре атмосферных исследований США. Это современная негидростатическая мезомасштабная модель на основе полной системы уравнений для сжимаемой жидкости. Ее исчерпывающее описание содержится в работе Скамарока [14]. Основным преимуществом модели WRF-ARW перед остальными продуктами подобного типа является возможность выбора подходящей схемы параметризации для любого блока подсеточных процессов. Модель активно развивается, поэтому исследователю доступен длинный список современных и хорошо зарекомендовавших себя схем. Дополнительно в модели имеется опциональная возможность применить гидростатическую аппроксимацию, что представляет важность для настоящей работы.

Полное уравнение для вертикальной скорости (W) в упрощенной (без пульсаций) форме для влажного воздуха в WRF-ARW записывается в виде

$$\frac{\partial W}{\partial t} + g \left(\mu_d - \frac{\alpha}{\alpha_d} \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) = F_w. \quad (1)$$

Здесь g – ускорение свободного падения, μ_d – масса столба сухого воздуха, α_d – удельная плотность сухого воздуха, α – удельная плотность влажного воздуха, η – вертикальная координата, $\frac{\partial p}{\partial \eta}$ – вертикальный барический градиент, член в правой части (F_w) содержит адвективные компоненты, а также отражает действие учитываемых в модели сил, турбулентного перемешивания и вращения Земли. При гидростатическом приближении уравнение (1) упрощается до вида

$$\frac{\partial p}{\partial \eta} = \frac{\alpha_d}{\alpha} \mu_d. \quad (2)$$

При этом вертикальная скорость в вычислительной процедуре не используется, однако может быть получена диагностически из уравнения для геопотенциала.

Валидация модельных результатов проводилась по данным дистанционных измерений осадков GPM (Global Precipitation Measurement) [7]. Эти данные представлены глобально (окончательная информация ограничена в области от 60° ю.ш. до 60° с.ш.) с горизонтальным разреше-

нием 0.1° и учитывают широкий спектр гидрометеоров как в твердой, так и в жидкой фазах.

В качестве дополнительного сравнения использовались данные современного атмосферного реанализа ERA-Interim [13] с пространственным разрешением 0.7°.

ПЛАНИРОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При конфигурации модели WRF-ARW использовалась вычислительная сетка с горизонтальным разрешением 15 км и 30-тью уровнями по вертикали. В качестве параметризации *вертикального турбулентного обмена* использовалась параметризация MYNN [11], это классическая k - ϵ модель, которая основана на схеме локального перемешивания турбулентной кинетической энергии, однако ее коэффициенты подобраны при помощи вихреразрешающих моделей, а масштаб перемешивания определяется как минимальный из масштабов турбулентности, плавучести и поверхностного слоя (на основе теории подобия Монина-Обухова). За параметризацию *приземного слоя* отвечает схема Eta [9], которая также основана на теории подобия Монина-Обухова и дополнительно имеет вязкий подслой. Над водой вязкий подслой восстанавливается явно [8], а над сушей его влияние учитывается через параметры шероховатости для температуры и влажности [15]. *Конвективные процессы* параметризуются при помощи модифицированной схемы Каина-Фритша [10]. Она основана на учете потока массы (у основания и верхней границы облака) и имеет хорошую обратную связь с мезомасштабной динамикой атмосферы. Для *параметризации микрофизики*, под которой понимаются процессы, протекающие на масштабах облачных капель и других частиц (так называемых гидрометеоров), использовалась схема WSM3 [5]. Эта схема использует три типа гидрометеоров (водяной пар, водность/ледность облаков и снег/дождь). Для *параметризации радиационных потоков* использовалась схема CAM [4]. Данная конфигурация хорошо себя показала в работе [2] при квазиклиматическом эксперименте над аналогичной территорией и характеристиками вычислительной сетки.

В качестве начальных и граничных условий WRF-ARW использовались данные окончательного анализа NCEP-FNL. Учитывая, что данные для верификации (GPM) доступны только с апреля 2014 г., численные эксперименты проводились для периодов: июль 2015 г. и январь 2016 г. Каждый эксперимент проводился в двух вариантах: с использованием полной системы уравнений и с гидростатической опцией; при этом остальные

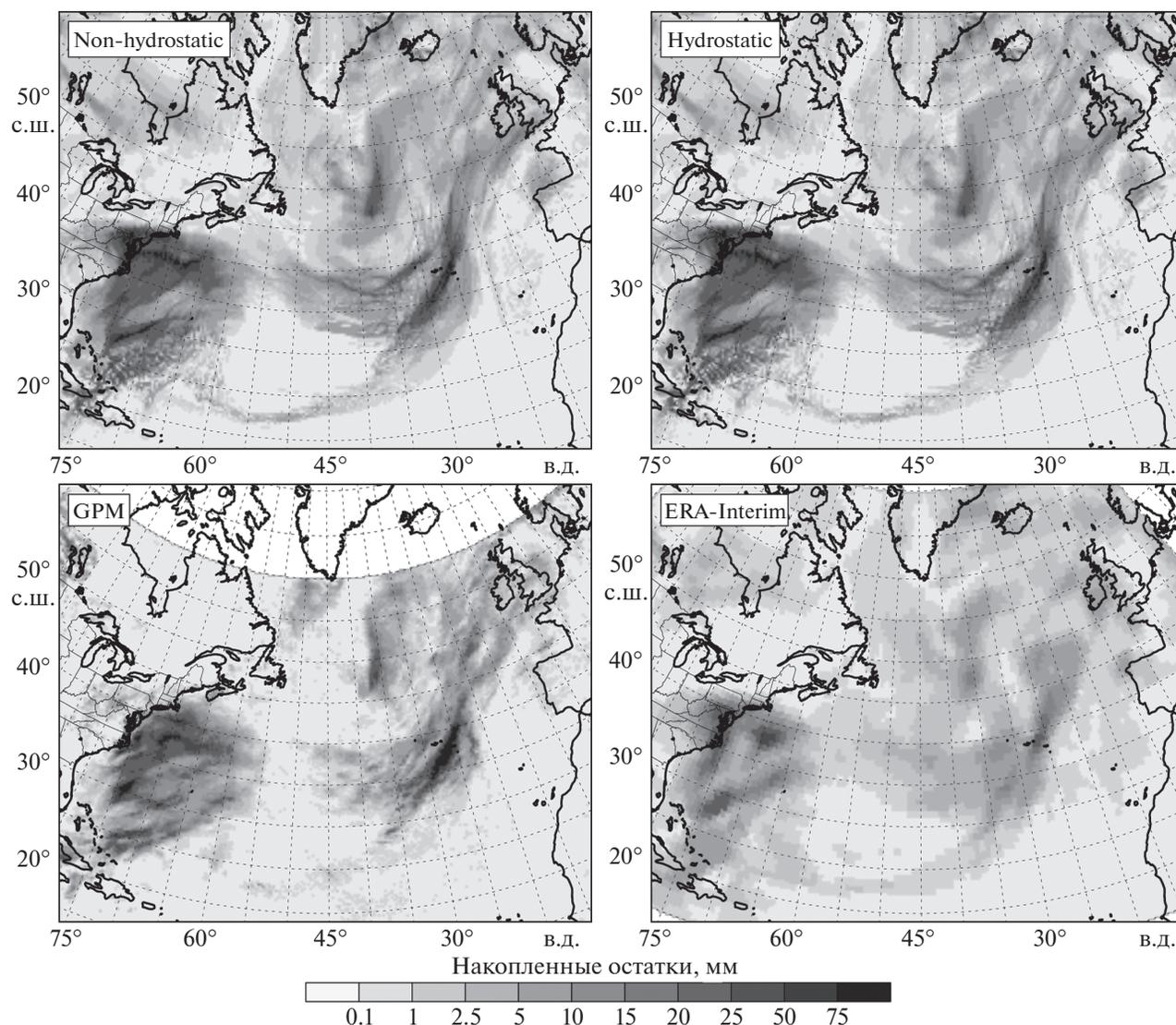


Рис. 1. Накопленные осадки (мм) за сутки 23.01. 2016 г. по данным WRF-ARW (негидростатическая и гидростатическая версии), дистанционных наблюдений (GPM) и реанализа ERA-Interim.

параметры конфигурации модели оставались неизменными. Качество численного воспроизведения динамического состояния приземной атмосферы неоднократно подтверждалась (см., например, [1, 2]), поэтому в данной работе акцент сделан исключительно на качестве воспроизведения осадков. Для краткости изложения ниже будут представлены результаты за одни сутки в январе и июле, однако общая тенденция справедлива для каждого месяца.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 представлено количество накопленных за сутки (23 января 2016 г.) осадков в рассматриваемом регионе. Очевидно, что оба результата

моделирования WRF-ARW хорошо согласуются с данными дистанционного зондирования, в отличие от данных реанализа ERA-Interim, где поле сглажено, что приводит к занижению высоких значений и значительному увеличению площади слабых (0.1–2 мм/сут) осадков. Также необходимо отметить, что не наблюдается видимой разницы между полной и гидростатической формулировкой записи уравнений движения.

Тот факт, что формулировка вертикальной скорости не влияет на поле осадков, может показаться странным, однако необходимо помнить, что во всех моделях они являются продуктом двух параметризаций: микрофизики (которая воспроизводит обложные осадки) и конвекции (ливневые осадки, связанные с глубокой конвекцией).

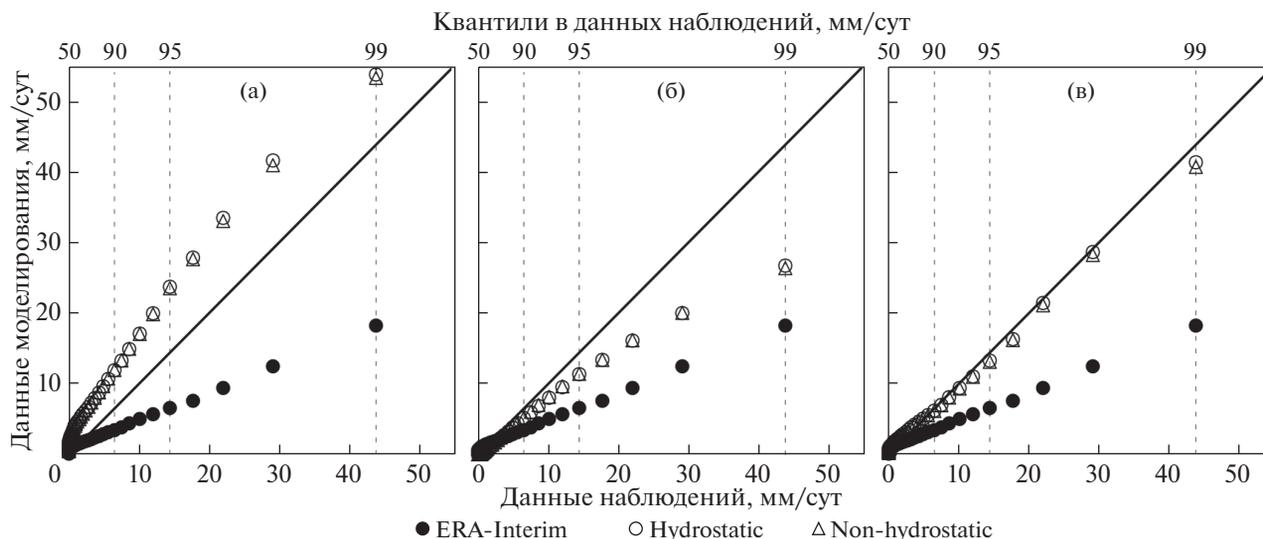


Рис. 2. График квантилей для накопленных суточных осадков (мм/сут) за 23.01.2016 г. по данным: моделирования WRF-ARW (негидростатическая и гидростатическая версии) для общего количества осадков (а), конвективных осадков (б) и обложных осадков (в); результату реанализа ERA-Interim. В сравнении с данными дистанционных наблюдений (GPM). На верхней оси представлены перцентили.

Обе эти схемы не используют вертикальную скорость в своих расчетах. Параметризации конвекции, как правило, основаны на принципе конвективного приспособления — они используют данные о температуре, влагосодержании и *горизонтальных* компонентах скорости ветра на предыдущем шаге по времени, чтобы скорректировать вертикальные профили температуры и влажности к влажноадиабатическим или неким заранее заданным профилям. Обложные осадки, с другой стороны, связаны со слоистой облачностью, которая, в силу своей большой пространственной протяженности, может быть рассчитана явно, однако все равно предполагает параметризацию микрофизики. Блок микрофизики в модели WRF-ARW срабатывает в конце каждого шага по времени (в схеме Рунге-Кутты) и фактически убирает перенасыщение, оставшееся после параметризации конвекции. Его работа основана на уравнениях переноса и экспоненциальной форме распределения размеров гидрометеоров. Учитывая, что для крупномасштабных движений атмосфера является квазидвумерной, вклад W в уравнении переноса пренебрежимо мал. По умолчанию, в выходной продукции WRF данные об осадках двух этих параметризаций выдаются отдельно. Чтобы получить общее количество, необходимо их суммировать.

На рис. 2 представлены квантиль-графики накопленных суточных осадков за 23 января 2016 г. по данным WRF-ARW, реанализа ERA-Interim в сравнении с дистанционными данными наблюдений.

Квантили получены по пространственному распределению. Модельные данные представлены в виде общего (конвективные + обложные) количества осадков (рис. 2а), за счет параметризации конвекции (рис. 2б) и за счет параметризации микрофизики (рис. 2в). Очевидно, что в зимний период высокоразрешающая модель несколько завышает общее количество осадков, в то время как реанализ показывает значительно меньшие величины, особенно в области интенсивных значений (выше 95-го перцентилля). Зимой преобладают обложные осадки, поэтому результаты моделирования, полученные только благодаря параметризации конвекции (рис. 2б), занижены. По этой же причине наблюдается хорошее согласование наблюдений и результата работы схемы микрофизики (рис. 2в). Несмотря на высокое качество данных дистанционного зондирования, разрешение GPM не позволяет в полной мере восстановить осадки в зимних конвективных структурах. Это объясняет более низкие значения для общего количества осадков и хорошее согласование с обложными осадками. Аналогичный результат был получен другими авторами на основе сравнения с данными наземных наблюдений, например, в работе Шарифи [12].

Следует отметить, что здесь также не наблюдается видимой разницы между полной и гидростатической версиями модели как для общего, так и для раздельного анализа количества осадков.

На рис. 3 представлены поля накопленных за сутки осадков (22 июля 2015 г.). Здесь также на-

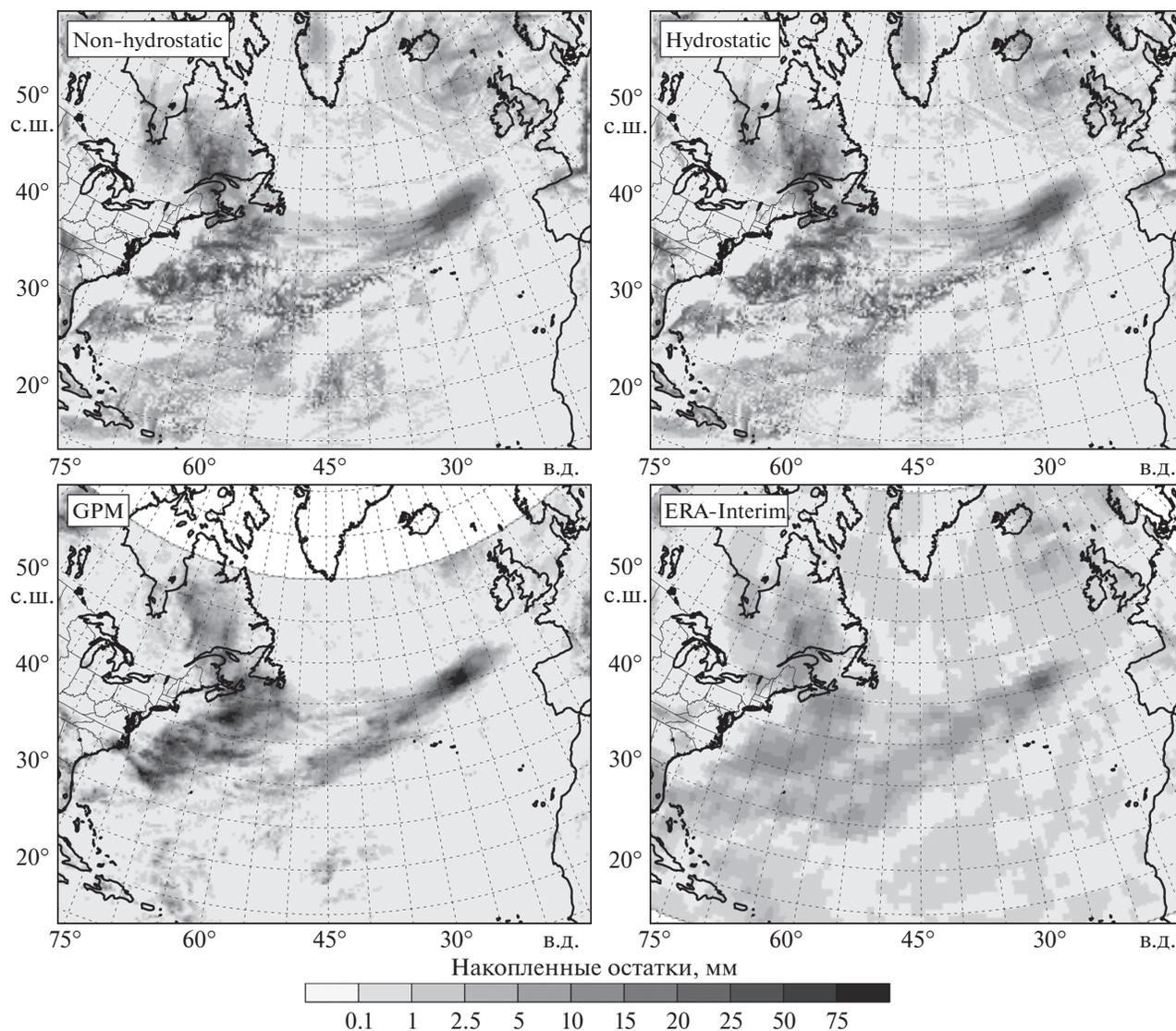


Рис. 3. Накопленные осадки (мм) за сутки 22.01.2015 г. по данным WRF-ARW (негидростатическая и гидростатическая версии), дистанционных наблюдений (GPM) и реанализа ERA-Interim.

блюдается хорошее пространственное согласование всех данных на качественном уровне. При этом очевидно, что реанализ ERA-Interim существенно сглаживает поля, показывая слабые (0.1–1.0 мм/сут) осадки почти на всей территории Северной Атлантики. Не наблюдается видимых отличий между полной и гидростатической версиями WRF-ARW, однако оба результата демонстрируют более фрагментированную структуру, чем данные дистанционного зондирования. По всей видимости, это также связано со сглаживающим эффектом более грубого разрешения спутниковых данных.

Развитие крупных конвективных процессов в летний период делает их хорошо различимыми как в вычислительной области модели, так и в

данных дистанционного зондирования GPM. По этой причине общее количество осадков (рис. 4а) демонстрирует хорошее согласие с незначительным завышением значений в результатах моделирования. Большую часть осадков воспроизводит конвективная составляющая (рис. 4б). Обложные осадки (рис. 4в) в летний период слабо выражены. Пространственное разрешение ERA-Interim не позволяет с нужной достоверностью воспроизводить конвективные процессы, следовательно, выпадение конвективных осадков также симулируется менее достоверно. Поэтому летние осадки в этом реанализе (а также в других глобальных реанализах) демонстрируют минимальную согласованность с наблюдениями и высокоразрешающим моделированием.

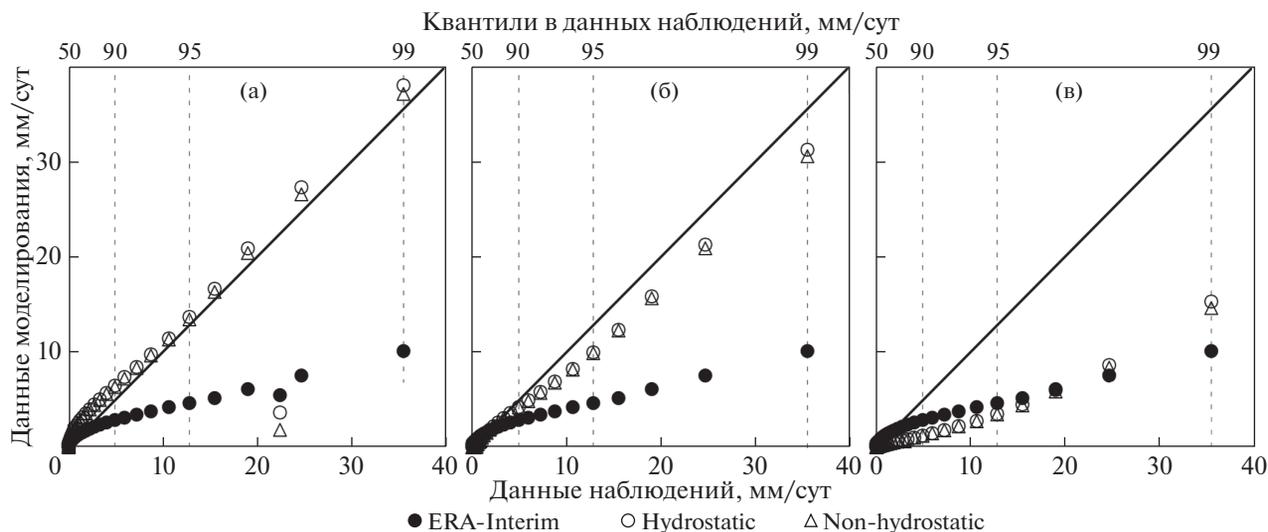


Рис. 4. График квантилей для накопленных суточных осадков (мм/сут) за 22.01.2015 г. по данным: моделирования WRF-ARW (негидростатическая и гидростатическая версии) для общего количества осадков (а), конвективных осадков (б) и обложных осадков (в); результату реанализа ERA-Interim. В сравнении с данными дистанционных наблюдений (GPM). На верхней оси представлены перцентили.

Летний период также не показывает значимых различий в количестве осадков между полной и гидростатической записями вертикальной скорости в диапазоне до 99-го перцентиля.

ВЫВОДЫ

По качеству воспроизведения накопленных суточных сумм осадков над Северной Атлантической атмосферной моделью WRF-ARW в текущей конфигурации удовлетворительно согласуется с данными дистанционного зондирования GPM как на качественном, так и на количественном уровнях. Показано, что в январе модель воспроизводит большее количество осадков, что, вероятно, связано с учетом зимней конвекции. Летом, когда конвективные процессы развиты хорошо и разрешаются как на вычислительной сетке модели, так и в данных GPM, согласование улучшается.

Численные эксперименты высокого разрешения (15 км) не показали значимых отличий между полной и гидростатической записями систем уравнений движения. Однако следует отметить два обстоятельства. Во-первых, эксперимент проходил в регионе с простой топографией (поверхность океана занимала большую часть вычислительной области). Во-вторых, для описания осадков обе версии использовали параметризации конвекции и микрофизики, которые не требуют значений вертикальной скорости в явном виде. Увеличение разрешения ниже 3 км позволит отключить параметризацию конвекции в надежде на то, что она будет воспроизводиться явно. По всей видимости, отключение параметризации конвекции ухудшит воспроизведение осадков в гидростатическом режиме.

Поскольку гидростатическая опция не влияет на воспроизведение осадков, следует заметить, что низкое качество данных об осадках в глобальных реанализах связано, главным образом, с низким разрешением, а не с гидростатической аппроксимацией.

Однако использование упрощенной вертикальной скорости в модели WRF-ARW не обеспечивает значимого вычислительного преимущества. Экономия составляет всего 2–3%. Это связано с тем, что блоки параметризаций являются наиболее вычислительно дорогими в современных региональных моделях.

Проведение вычислительной части исследований, а также анализ результатов выполнены за счет РНФ (проект № 14-50-00095). Подготовка и обработка экспериментальных данных осуществлена в рамках проекта Минобрнауки РФ 14.616.21.0035, идентификационный номер RFMEFI61615X0035.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гавриков А. В., Иванов А. Ю. Аномально сильная бора на Черном море: наблюдение из космоса и численное моделирование // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2015. Т. 51. № 5. С. 615–626.
2. Маркина М. Ю., Гавриков А. В. Изменчивость ветрового волнения в Северной Атлантике за зимы в период с 1979 по 2010 г. по данным численного моделирования // Океанология. 2016. Т. 56. № 3. С. 346–352.
3. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3, Ч. 1. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 299 с.

4. *Collins W.D., Rasch P.J., Boville B.A. et al.* Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM 3.0) // Boulder, Colorado: NCAR, 2004. P. 226.
5. *Hong S.-Y., Dudhia J., Chen S.-H.* A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation // *Mon. Weather Rev.* 2004. V. 132. № 1. P. 103–120.
6. *Hou A.Y., Kakar R. K., Neeck S. et al.* The Global Precipitation Measurement Mission // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2014. V. 95. P. 701–722, doi 10.1175/BAMS-D-13-00164.1
7. *Huffman G., Bolvin D., Nelkin E.J.* Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG), version 4.4. NASA's Precipitation Processing Center, accessed 31 March, 2015, ftp://arthurhou.pps.eosdis.nasa.gov/gpmdata/.
8. *Janjić Z.I.* The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer, and Turbulence Closure Schemes // *Mon. Weather Rev.* 1994. V. 122. № 5. P. 927–945.
9. *Janjić Z.I.* Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada level 2.5 scheme in NCEP Meso model // NCEP Office Note, 2002. P. 437.
10. *Kain J.S.* The Kain–Fritsch Convective Parameterization: An Update // *J. Appl. Meteorol.* 2004. V. 43. № 1. P. 170–181.
11. *Nakanishi M., Niino H.* Development of an Improved Turbulence Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer // *J. Meteorol. Soc. Japan.* 2009. V. 87. P. 895–912.
12. *Sharifi E., Steinacker R., Saghafian B.* Assessment of GPM-IMERG and Other Precipitation Products against Gauge Data under Different Topographic and Climatic Conditions in Iran: Preliminary Results // *Remote Sens.* 2016. V. 8. № 135. doi 10.3390/rs8020135
13. *Simmons, A., Uppala S., Dee D. et al.* ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. ECMWF Newsletter, No. 110, ECMWF, Reading, United Kingdom, 2007, P. 25–35.
14. *Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J. et al.* A description of the Advanced Research WRF Version 3 // NCAR Technical Note, Boulder, Colorado: NCAR, 2008. P. 125.
15. *Zilitinkevich S.S.* Non-local turbulent transport pollution dispersion aspects of coherent structure of convective flows // *Air Pollut. III, Air Pollut. theory simulation, Comput. Mech. Publ, Southampton, Bost.* 1995. V. 1. P. 53–60.

Estimation of Precipitation Quality and Influence of Hydrostatic Approximation in the WRF-ARW Model over the North Atlantic

A.V. Gavrikov

The WRF-ARW (Weather Research and Forecast model with Advanced Research dynamical solver) was used to simulate winter (Jan 2016) and summer (Jul 2015) precipitation over the North Atlantic with 15 km of spatial resolution. Validation of precipitation results was done using the GPM (Global Precipitation Measurement) data. Comparison with ERA-Interim reanalysis was also provided. All numerical experiments were performed for non-hydrostatic and hydrostatic option of WRF-ARW to clarify the impact of hydrostatic approximation on precipitation results in the model. The model results showed good agreement with GPM data at all analyzed time intervals. Given the current spatial resolution and region, no evidence of hydrostatic approximation was detected.