

УДК 551.46.06:[551.524+551.526.6]. 072

## КОРРЕКЦИЯ РЕАНАЛИЗА ДАННЫМИ БУЙКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ МОДЕЛИ WRF

*Я.В. Стригунова<sup>1</sup>, К.Ю. Булгаков<sup>1, 2</sup>, А.И. Угрюмов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Российский государственный гидрометеорологический университет,  
strigunova.jana@yandex.ru

<sup>2</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

Обосновывается необходимость коррекции полей атмосферного реанализа. Предложенный авторами метод такой коррекции применен для областей океана с использованием модели WRF. Он заключается в поправке полей температуры поверхности океана в реанализе по данным прямых измерений, проведенных на буйковых станциях. Установлено, что коррекция позволяет уменьшить ошибки в полях реанализа. Помимо этого, отмечено, что разница в воспроизведении температуры воздуха изменяется в зависимости от сезона. Указанный метод успешно апробирован для тропической области Атлантического океана и может быть использован при повышении качества реанализа.

*Ключевые слова:* реанализ, модель WRF, тропическая область Атлантического океана.

## CORRECTION OF REANALYSIS BY WRF MODEL WITH BUOY OBSERVATION DATASET

*Ya. V. Strigunova<sup>1</sup>, K. Yu. Bulgakov<sup>1, 2</sup>, A. I. Ugryumov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Russian State Hydrometeorology University

<sup>2</sup> Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences

Necessity of correction of atmospheric reanalysis field is substantiated. The correction method proposed by the authors is applied to ocean area by using the WRF model. It consists in the amendment of the ocean surface temperature fields in the reanalysis according to the direct measurements made at the buoy stations. It is established that correction allows to reduce errors in the fields of reanalysis. In addition, it is noted that the difference in the reproduction of air temperature varies with the season. This method has been successfully tested for the tropical area of the Atlantic Ocean and can be used to improve the quality of reanalysis.

*Keywords:* reanalysis, WRF model, tropical area of Atlantic Ocean.

### Введение

В настоящее время все более широкое распространение в метеорологии и климатологии приобретают архивы реанализа. Эти данные могут быть использованы при решении как фундаментальных (например, исследование климатических обратных связей) [2], так и прикладных (расчет глубины протаивания многолетнемерзлых пород и т.д.) [1] задач. Наиболее часто применяют реанализ для верификации моделей.

Однако данные, полученные в результате ассимиляции, являются лишь оптимальной оценкой полей метеорологических величин. В свою очередь, данные наблюдений, особенно в точке, считаются более достоверными. В [6] показано, что ряды реанализа имеют существенное отличие от данных наблюдений. Эти ошибки

могут быть следствием работы численных процедур, которые обрабатывают данные наблюдений, проводя временную и пространственную аппроксимацию. Другой источник ошибок — неполнота входных данных. Очевидно, что далеко не все архивы наблюдений могут быть общедоступны.

Другая, чисто техническая сложность — внедрение архивов. Архивы могут состоять из рядов данных, различных по формату, а потому их внедрение в ассимиляцию может сопровождаться нарушением целостности данных, что влечет за собой появление ошибок. Также архивы данных могут иметь пропуски и разные временные интервалы измерений. Поэтому при составлении реанализа используют архивы однородных по структуре и способу записи данных, которые покрывают значительные площади (например, данные сети метеорологических станций, постов, аэропортов, а также данные радиолокационных и спутниковых наблюдений). Ряды данных наблюдений с отдельных станций, не являющихся частью одной сети, могут не использоваться при создании реанализа. При этом зачастую такие ряды наблюдений были получены в регионах, где не проводится других измерений, и для этих регионов различия между реанализом и данными наблюдений будут существенными [5].

На рис. 1 в качестве примера представлены данные о температуре поверхности океана (ТПО) в точке ( $15^\circ$  с.ш.,  $38^\circ$  з.д.) из архивов: ERA-20C [9] и ERA-Interim [3], а также данные о ТПО, полученные с помощью буя проекта PIRATA [4].

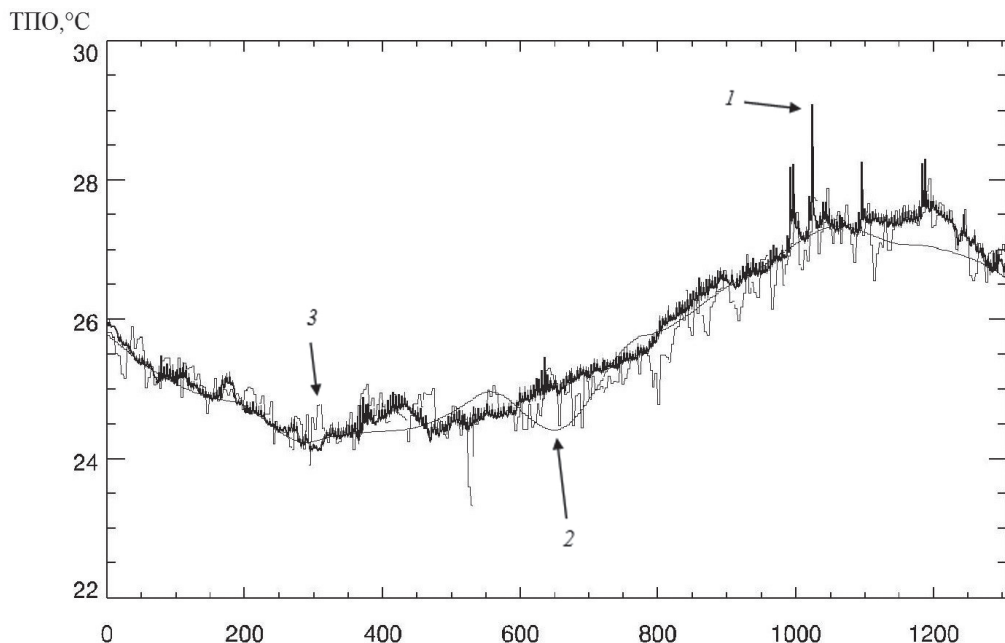


Рис. 1. Сопоставление архивов данных наблюдений за температурой поверхности океана. 1 — данные с буя PIRATA, 2 — данные реанализа ERA-20C, 3 — данные реанализа ERA-Interim.

Оба реанализа имеют дискретность 3 часа с шагом полградуса. Из рисунка видно, что в отдельные моменты времени ошибки у реанализов для этой точки существенны. Наибольшее различие отмечается в зимние месяцы и составляет  $2,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  для ERA-20C, и  $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  для ERA-Interim. Сравнение результатов прямых наблюдений и данных архивов реанализа в целом имеет, скорее, иллюстративный характер. Несмотря на то что координаты буя точно совпадают с координатами узла реанализа, значения ТПО в данном узле являются средним значением для области с площадью ячейки (для используемых реанализов это  $0,5\times 0,5^{\circ}$ ). Для корректного сравнения данных наблюдений в конкретной точке и различных архивов реанализа необходимо применить даунскейлинг. Однако ввиду того, что градиенты ТПО в данной области малы (около  $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ км}$ ), можно считать, что поле ТПО в общем однородно. Поэтому следует ожидать, что даунскейлинг не внесет существенных изменений в результат, представленный на рис. 1.

Таким образом, можно заключить, что при использовании данных реанализа в отдельных областях необходимо проводить его коррекцию. Поскольку поля реанализа физически согласованы, то такая коррекция не может быть проведена простым изменением значения метеорологической величины в точке, где доступны данные наблюдений, на измеренное значение. Очевидно, что такой подход может нарушить согласованность полей.

С точки зрения авторов наиболее физически обоснованным способом коррекции является использование математических моделей. В настоящее время такие модели используются как метеорологический постпроцессор, который позволяет проводить интерполяцию полей из сетки реанализа на более мелкую сетку как по пространству, так и по времени. Реанализ в таком случае используется как начальные и граничные условия. Конечно, такой метод имеет определенные недостатки: требуются значительные вычислительные ресурсы, модель вносит ошибку вычислений. Тем не менее такой метод имеет и ряд преимуществ, а именно высокую детализацию получаемых полей и их физическую согласованность. Также модели циркуляции атмосферы имеют процедуры ассимиляции данных, такие процедуры можно применять для коррекции реанализа.

При этом необходимо понимать, что способ коррекции будет определяться физической величиной и типом измерений, а также областью, где получены данные измерения.

### Метод коррекции

Был предложен способ коррекции реанализа по данным прямых измерений ТПО. Источниками таких данных могут быть измерительные буй. Ряды данных наблюдений, полученных на них, имеют следующие преимущества: данные, полученные с одного буя, относятся к фиксированной точке в пространстве, проводимые на буях измерения обладают высокой точностью.

Для области океана, в которой расположен буй, производится запуск модели региональной циркуляции атмосферы (например, WRF [7]). Данные реанализа, для которых проводится коррекция, используется как начальные и граничные условия.

На каждом временном шаге в поле ТПО из данных реанализа вводится поправка по данным прямых измерений. Вычисляется разность между ТПО реанализа для точки с координатами буя и ТПО по данным буйковых измерений. Полученная разность прибавляется ко всему полю ТПО реанализа, которое является нижним граничным условием для уравнения притока тепла. С учетом того что воздух имеет малую термическую инерцию, приспособление полей в решении к новой температуре поверхности произойдет в течение нескольких часов.

Стоит отметить, что предлагаемый метод не может быть использован для любых областей Мирового океана. Необходимо, чтобы в регионе, для которого проводится коррекция, отсутствовали большие горизонтальные градиенты ТПО и сильные течения. В этом случае можно ожидать, что вводимая в ТПО коррекция будет справедлива для всего региона.

### Апробация метода

Метод был тестирован на реанализе NCEP FNL [8], который корректировался данными буя PIRATA в точке  $15^{\circ}$  с.ш.,  $38^{\circ}$  з.д. Коррекция осуществлялась для области приблизительно  $2000 \times 2000$  км. На основе климатической версии модели WRF-ARW V.3.4.1 была построена сетка для этого района с горизонтальным шагом 50 км. Центр расчетной области находился в точке с координатами используемого буя. В данной области нет океанических фронтов или сильных течений и горизонтальные градиенты ТПО невелики, поэтому возможно использовать предлагаемый метод для этого района.

Были проведены два эксперимента по воспроизведению гидрометеорологических величин в период с 1 января по 23 ноября 2007 г. В первом эксперименте использовалась вышеописанная коррекция, второй проводился без коррекции. Наибольшая разница в результатах экспериментах проявилась в полях температуры воздуха на высоте 2 м. Проводилось сравнение результатов экспериментов с данными измерений температуры воздуха на бую.

С января по март (рис. 2) результаты обоих экспериментов достаточно близки. Ошибка в эксперименте с коррекцией не превышает ошибку в эксперименте без коррекции; исключения составляют лишь нескольких коротких периодов. В эти периоды коррекция завышает ошибки незначительно, до  $0,15^{\circ}\text{C}$ . Наибольшая разница наблюдается в конце января, когда за счет коррекции ошибка существенно уменьшилась (примерно на  $0,5^{\circ}\text{C}$ ).

В начале второго периода (рис. 3) коррекция значительно уменьшает ошибку (до  $0,5^{\circ}\text{C}$ ). Ошибка в эксперименте с коррекцией для конца апреля и первой половины мая больше (до  $0,2^{\circ}\text{C}$ ), чем в эксперименте без ее внедрения. Затем, до конца июня, результаты эксперимента с коррекцией ближе к данным наблюдений.

С июля по сентябрь (рис. 4) эксперимент с коррекцией показал наилучший результат. Ошибка эксперимента с коррекцией меньше, чем ошибка эксперимента без коррекции, практически за весь указанный период за исключением промежутка времени в первой половине июля, когда ошибки близки, и двух коротких отрезков (в конце июля и середине сентября), когда эксперимент без коррекции показал

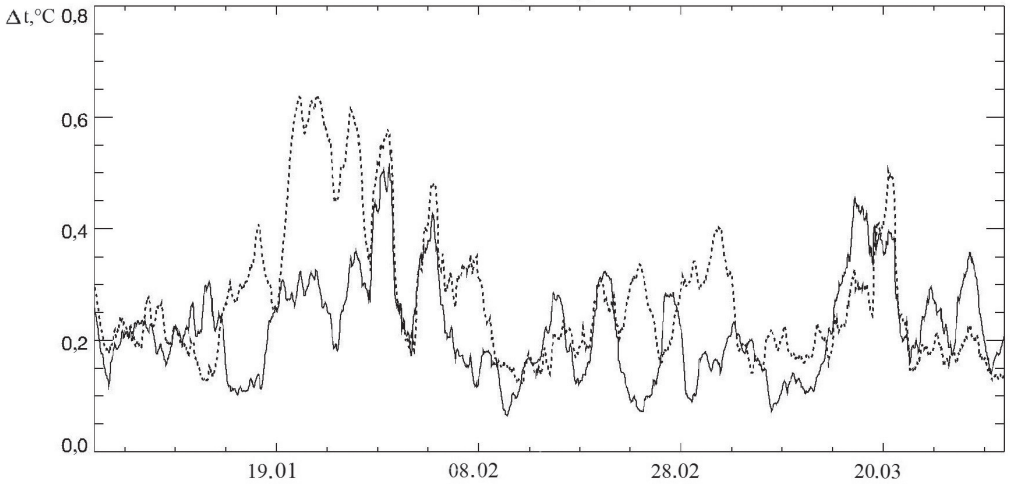


Рис. 2. Ошибка в воспроизведении температуры воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ ) на высоте 2 м за период январь — март 2007 г.

Сплошная кривая — результаты эксперимента с коррекцией, штриховая — без коррекции.

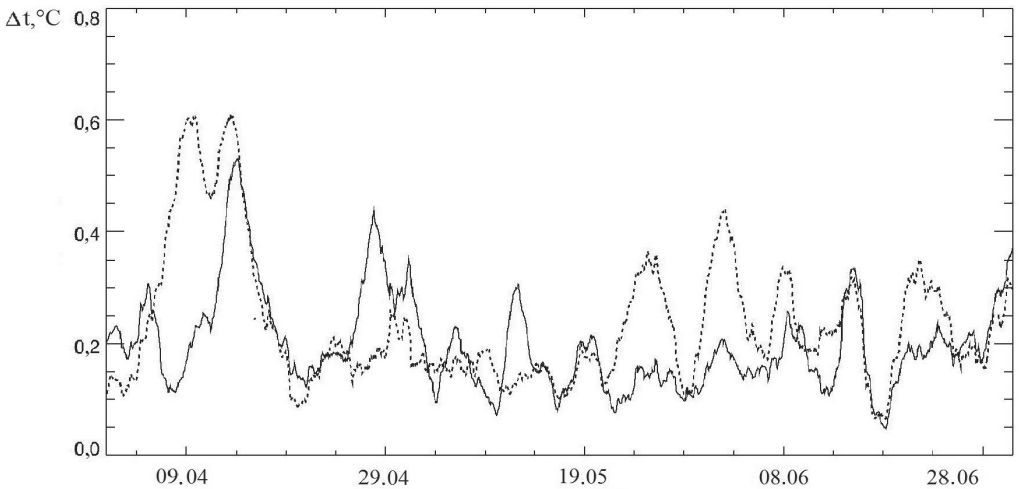


Рис. 3. Ошибка в воспроизведении температуры воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ ) на высоте 2 м за период апрель — июнь 2007 г.

Сплошная кривая — результаты эксперимента с коррекцией, штриховая — без коррекции.

чуть меньшую ошибку. При этом во второй половине июля коррекция позволила уменьшить ошибку почти на  $0,8^{\circ}\text{C}$ , а в августе — до  $0,5^{\circ}\text{C}$ .

С октября по ноябрь результаты экспериментов близки. Можно выделить только резкое увеличение ошибки 5 ноября, которое коррекция позволила немного сгладить.

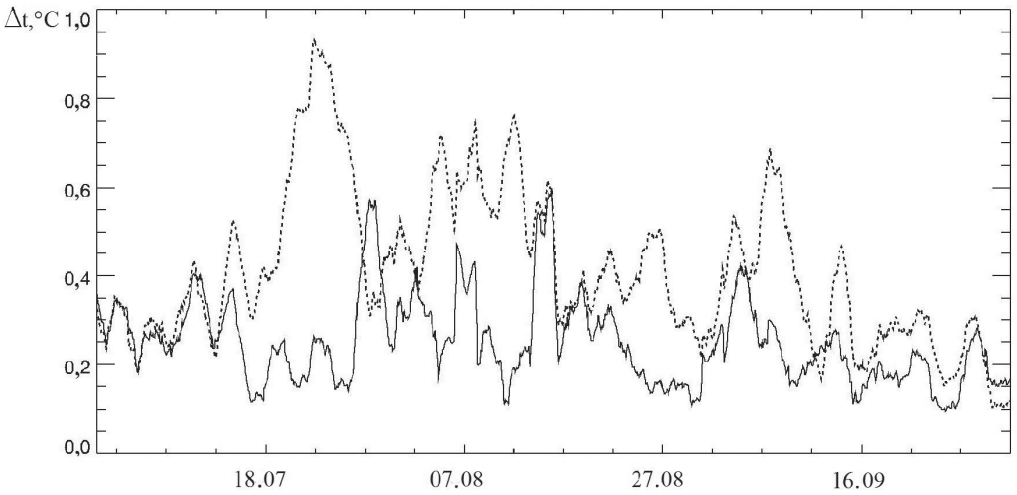


Рис. 4. Ошибка в воспроизведении температуры воздуха (°C) на высоте 2 м за период июль — сентябрь 2007 г.

Сплошная кривая — результаты эксперимента с коррекцией, штриховая — без коррекции.

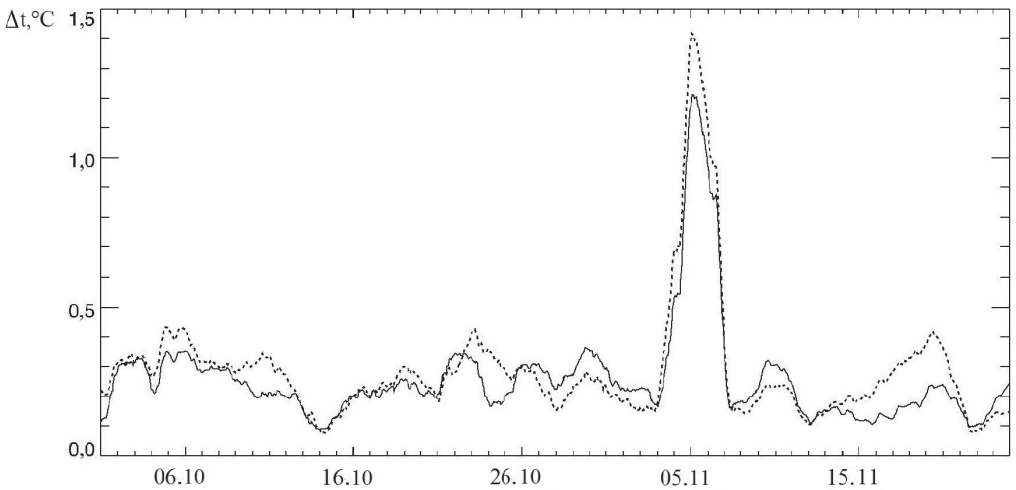


Рис. 5. Ошибка в воспроизведении температуры воздуха (°C) на высоте 2 м за период октябрь — ноябрь 2007 г.

Сплошная кривая — результаты эксперимента с коррекцией, штриховая — без коррекции.

Известно, что существует достаточно сильное взаимодействие между ТПО и приземной температурой воздуха (корреляция между ТПО и приземной температурой воздуха, полученная в результате экспериментов, составила 97 %), и, значит, можно утверждать, что распределение температуры воздуха определяется в основном ходом ТПО. В соответствии с этим вносимая коррекция ТПО

будет положительным образом сказываться на значениях приземной температуры. Именно это и было продемонстрировано в настоящей работе: коррекция позволила уменьшить ошибку воспроизведения температуры воздуха в приводном слое (максимальное уменьшение до 0,8 °С). В отдельных случаях ошибка эксперимента с коррекцией была больше, чем ошибка эксперимента без коррекции, но это превышение было незначительным: до 0,2 °С. Таким образом, полученные результаты нельзя назвать случайными.

### Заключение

В ходе настоящей работы было проведено сопоставление данных реанализа с фактическими. Для устранения ошибок применялся метод коррекции, использующийся в серии экспериментов.

Основным результатом выполненной работы является применимость описываемого метода в тех областях открытого океана, в которых не наблюдается больших горизонтальных градиентов ТПО. Доказательством применимости данного метода являются полученные результаты: коррекция позволила уменьшить ошибку реанализа в воспроизведении экстремума температуры воздуха в сентябре. Из этого следует, что вышеупомянутый метод коррекции может быть использован с целью улучшения качества реанализа.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0001).*

### Список литературы

1. *Огородникова Н.Н., Федорова И.В.* Расчет глубины протаивания многолетнемерзлых пород на примере о. Самойловского (дельта реки Лены). «Водная среда и природно-территориальные комплексы: исследование, использование, охрана»: материалы IV Школы-конференции молодых ученых с международным участием (26—28 августа 2011 г.). Петрозаводск, 2011. С. 29—33.
2. *Семенов В.А.* Колебания современного климата, вызванные обратными связями в системе «атмосфера — арктические льды — океан» // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2015. Т. 1, № 1. С. 232—248.
3. *Berrisford P.* et al. ERA report series. 2011. P. 1.
4. *Boullès B.* et al. The Pirata Program: History, Accomplishments, and Future Directions // *BAMS*. Aug. 2008. P. 1115.
5. *Kubota M.* et al. Surface heat fluxes from the NCEP/NCAR and NCEP/DOE reanalyses at the Kuroshio Extension Observatory buoy site // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. Is 2. DOI:10.1029/2007JC004338.
6. *Ma L.* et al. Evaluation of ERA-40, NCEP-1, and NCEP-2 reanalysis air temperatures with ground-based measurements in China // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 13. Is. 15. DOI:10.1029/2007JD009549.
7. *Michalakes J.* et al. The Weather Research and Forecast Model: Software Architecture and Performance / Proc. 11th ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing In Meteorology, 25—29 October 2004, Reading U.K. / Ed. George Mozdzynski.
8. National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce. NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, Boulder, CO, 2000. [Available online at <http://dx.doi.org/10.5065/D6M043C6>.] Accessed 10 07 2015-11-14.
9. *Poli P.* et al. ERA-20C: An Atmospheric Reanalysis of the Twentieth Century // *J. Climate*. 2016. V. 29, No. 11. P. 4083—4097. <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0556.1>