

УДК 519.6; 519.2

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ПОТОКОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОКЕАНА И АТМОСФЕРЫ В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ

Н. П. Тучкова¹ [0000-0001-5357-9640], К. П. Беляев² [0000-0003-2111-2709],
Г. М. Михайлов³ [0000-0002-4535-7180]

^{1, 2, 3}Вычислительный центр им. А.А. Дородницына ФИЦ Информатика
и управление РАН, г. Москва

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

¹natalia_tuchkova@mail.ru, ²kosbel55@gmail.com, ³gmickail@ccas.ru,

Аннотация

Проанализированы данные наблюдений 1979–2018 гг. в районе Северной Атлантики, полученные в результате реализации проекта Российской академии наук по исследованию атмосферы в Северной Атлантике (РАН-НААД). Набор данных предоставляет множество параметров поверхности и свободной атмосферы на основе сигма-модели и отвечает многим требованиям метеорологов, климатологов и океанографов, работающих как в исследовательской, так и в оперативной областях. Проведен анализ сезонной и многолетней изменчивости тепловых потоков и температуры поверхности воды в Северной Атлантике. В качестве основного метода исследования использованы схемы анализа диффузионных процессов. На основе заданных рядов длиной в 40 лет с 1979 по 2018 годы вычислены такие параметры диффузионных процессов, как среднее (снос процесса) и дисперсия (диффузия процесса) и построены их карты и временные кривые. Численные расчеты выполнены на суперкомпьютере Ломоносов-2 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Ключевые слова: анализ временных рядов, климатический сезонный ход, максимальные и минимальные значения давления внутри климатического года

ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящена вероятностному анализу данных наблюдений в районе Северной Атлантики. Предварительные исследования, проводимые в рамках

проекта РАН-НААД [1], позволили получить 40-летний трехмерный ретроспективный прогноз атмосферы Северной Атлантики (10° – 80° с. ш.) с пространственным разрешением 14 км и 50-ю уровнями в вертикальном направлении (до 50 гПа). Прогноз выполнен с региональной настройкой модели WRF-ARW3.8.1¹ для периода 1979–2018 гг. и значений реанализа ERA-Interim² в качестве граничных условий. Набор данных предоставляет множество параметров поверхности и свободной атмосферы на основе сигма-модели в границах выбранного региона.

Предпосылки этих исследований определяются востребованностью развития методов математического моделирования и прогнозирования в области экологии. Приложение результатов исследований состоит в развитии методов вероятностного анализа для оценки физических характеристик диффузионных процессов на примере полей температуры и потоков тепла, а также оценки начальных значений при численном моделировании.

Проанализированы такие параметры, как приводная температура воздуха (2 m temperature, °C) и тепловые потоки океан-атмосфера, а именно, поток явного тепла (surface sensible heat flux Wm^{-2} , Вт/м²), поток скрытого тепла (surface latent heat flux Wm^{-2} , Вт/м²). Массив данных составляют значения за 40 лет в каждой точке сетки (south_north=550, west_east=550) с интервалом измерений в 3 часа (т. е. 2920 измерений в год для невисокосных и 2928 для високосных лет, соответственно). На рис. 1 (а, б) приведены примеры значений наблюдаемых величин явного и скрытого тепла на 1 января 2015 г. в Северной Атлантике.

Метод, предложенный в статье, достаточно известен в теории временных рядов [2], однако для анализа потоков тепла ранее не применялся. Нами показано, что этим методом можно выявить новые интересные закономерности. Ранее авторы проводили аналогичные исследования с одним параметром, полем давления [3].

¹ <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>

² <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim>

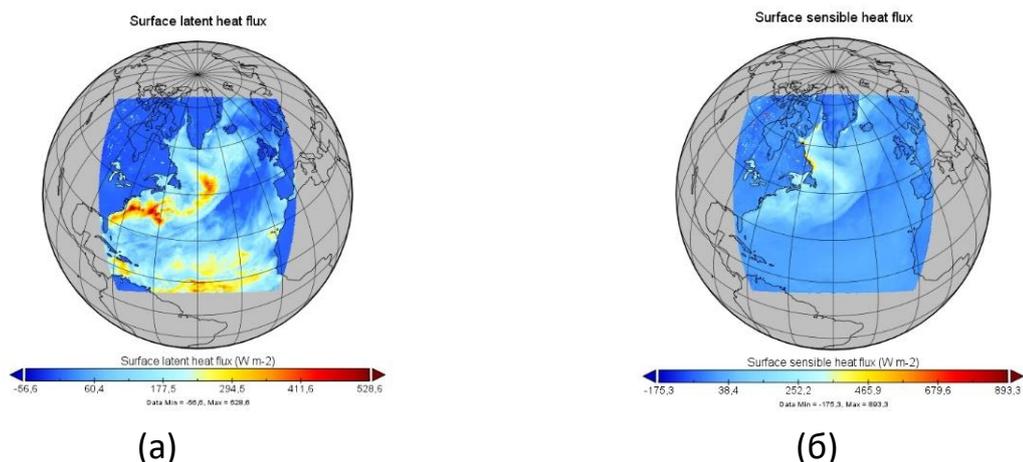


Рис. 1. Значения потоков тепла (Wm^{-2}) 01.01.2015: а) явного; б) скрытого

На начальном этапе данного исследования были получены предварительные оценки для наблюдаемых в регионе значений суммарного тепла и температуры воздуха (температура на высоте 2 м над уровнем поверхности воды). На рис. 2 показан пример наблюдаемого поля температуры в выбранном регионе на 1 января 2015 г.

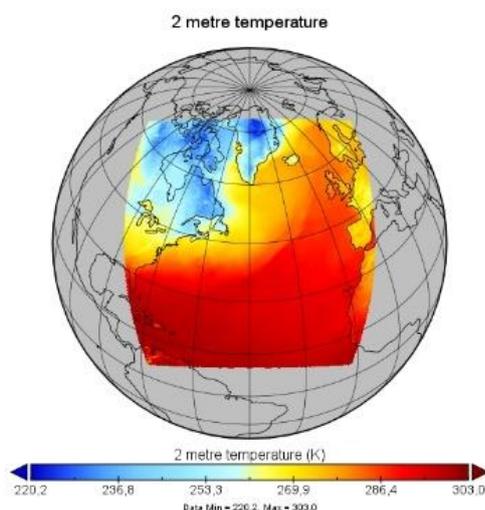


Рис. 2. Значения поля температуры (K) в регионе 01.01.2015

На рис. 3–5 представлены графики сезонного хода минимумов, максимумов и частотного распределения температуры и потоков суммарного тепла (явного и скрытого), полученные из анализа данных эксперимента РАН-НААД.

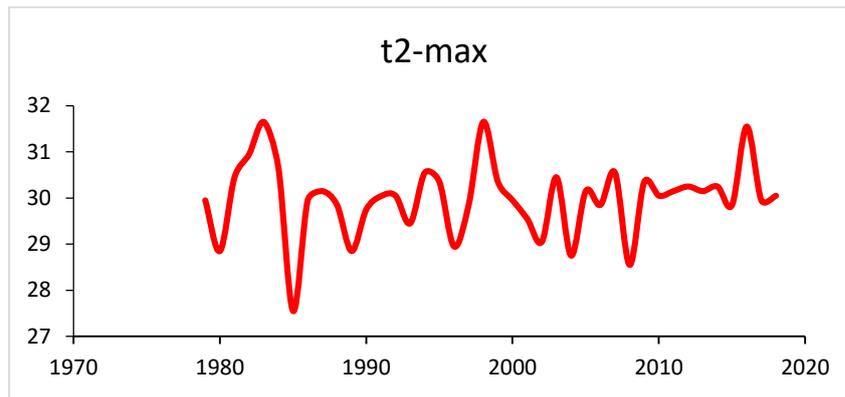


Рис. 3. Сезонный ход максимумов поверхностной температуры по всему региону с 1979 по 2018 гг.

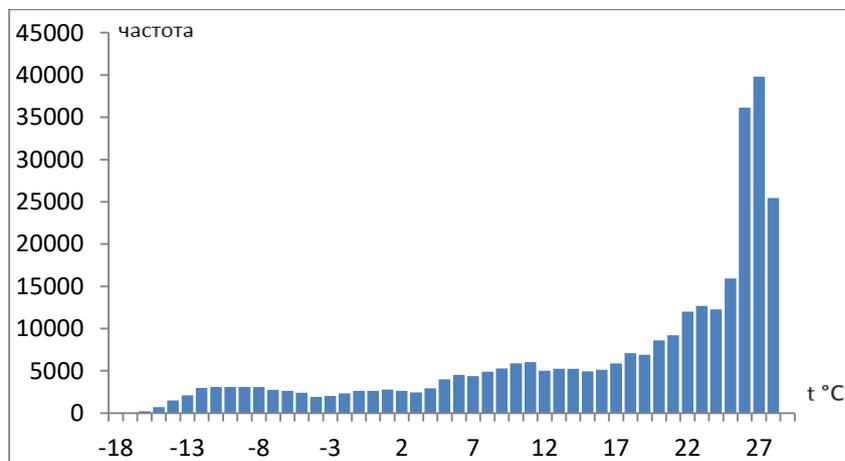


Рис. 4. Гистограмма частот средней температуры по всему региону за январь и весь период наблюдений с 1979 по 2018 гг.

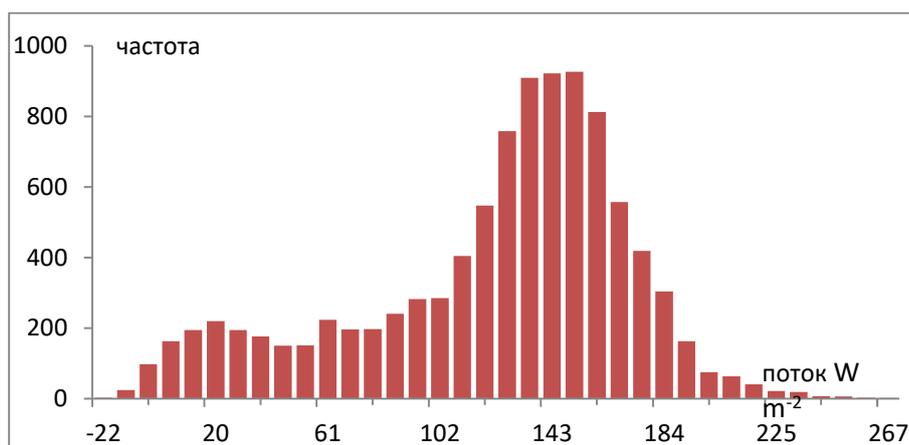


Рис. 5. Гистограмма частот среднего суммарного потока тепла, усредненного по всему региону на 1 января за весь период наблюдений с 1979 по 2018 гг.

Аналогично предыдущим исследованиям авторов [3], изменчивость случайного процесса представляется в виде

$$dX = a(t, X)dt + b(t, x)dW, \quad (1)$$

где X – значение поля (температуры и потока тепла, в данном случае применительно к настоящим исследованиям) в момент времени t в точке с заданными координатами, t – время, dW – стандартное обозначение гауссова «белого шума» – обобщенного случайного процесса с нулевым средним значением и дисперсией, равной единице, при этом его ковариационная функция равна дельта-функции, то есть $E dW(t)dW(\tau) = \delta(t - \tau)$. Здесь и далее $\delta(t - \tau) = 1$, если $t = \tau$, и нулю, если нет, $a(t, X), b(t, x)$ – некоторые функции. Выражение (1) понимается в интегральном смысле, то есть

$$X(t + \Delta t) - X(t) = \int_t^{t+\Delta t} a(u, X)du + \int_t^{t+\Delta t} b(u, X)[W(u + du) - W(u)]. \quad (2)$$

В формуле (2) выражение $W(u + du) - W(u)$ представляет собой гауссову случайную величину с нулевым средним и дисперсией, равной du . Теория стохастического интеграла и все определения, необходимые для понимания формул (1) и (2), содержатся в [4–6].

Согласно первоисточнику [4], для определения коэффициентов $a(t, X)$ и $b(t, x)$ применяют следующие выражения:

$$a(t, x) = (dt)^{-1} \int_t^{t+dt} (y - x)p(y | x)dy, \quad (3)$$

$$b^2(t, x) = (dt)^{-1} \int_t^{t+dt} (y - x)^2 p(y | x)dy, \quad (4)$$

где в формулах (3) и (4) использованы следующие обозначения:

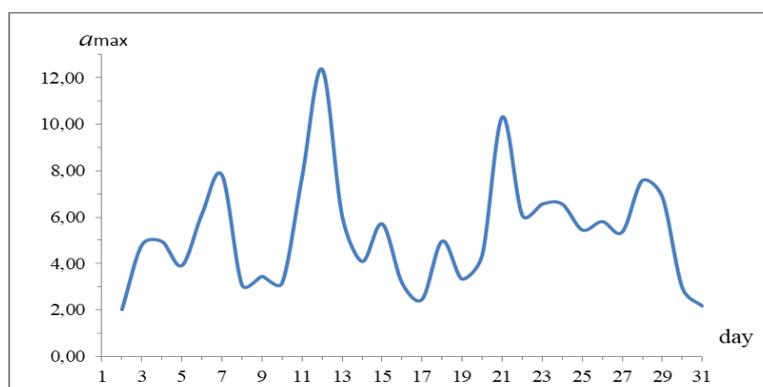
y, x – значения процесса $X(t)$ в моменты времени $t+dt$ и t ;

$p(y|x)dt$ – вероятность (условная вероятность) события, когда значения $X(t+dt)=y$ при условии $X(t)=x$, то есть когда выполняется равенство

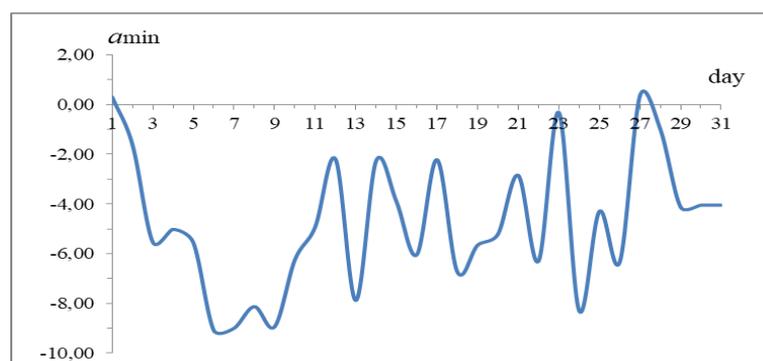
$$p(y | x)dt = P(X(t + dt) = y | P(t) = x).$$

Ставится задача – вычислить эти коэффициенты и произвести анализ полученных характеристик.

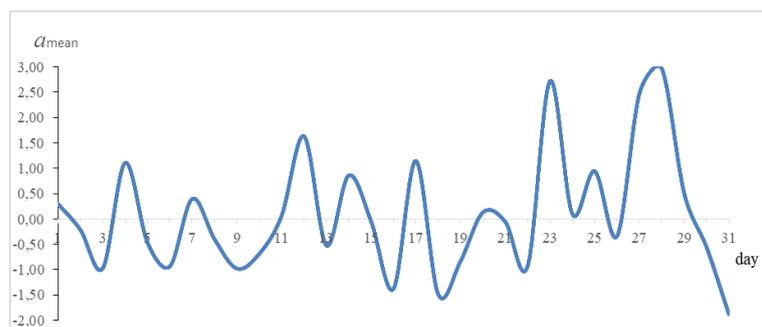
По приведенным формулам были произведены численные расчеты. Далее были проанализированы их результаты, некоторые из них, а именно, статистические характеристики параметров $a(t, X)$ и $b^2(t, x)$ за климатический январь, представлены на рис. 6–9. Такие характеристики получены на каждый климатический месяц за весь период наблюдений и на всем пространстве измерений. Из этих оценок следует, что среднее значение климатического месяца соответствует годовичному циклу климатического года.



(a)



(б)



(в)

Рис. 6. Кривые поведения коэффициента $a(t, X)$ для климатического января суммарного потока: (а) максимумы; (б) минимумы; (в) средние по всему региону за 1979–2018 гг.

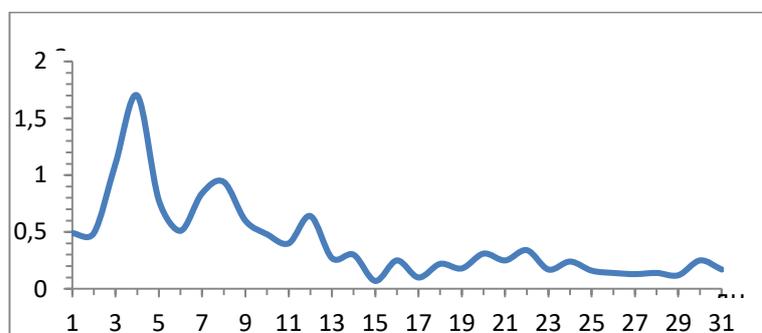


Рис. 7. Кривая значений максимумов коэффициента $a(t, X)$ для значений температуры усредненного января за 1979–2018 гг. по всему региону

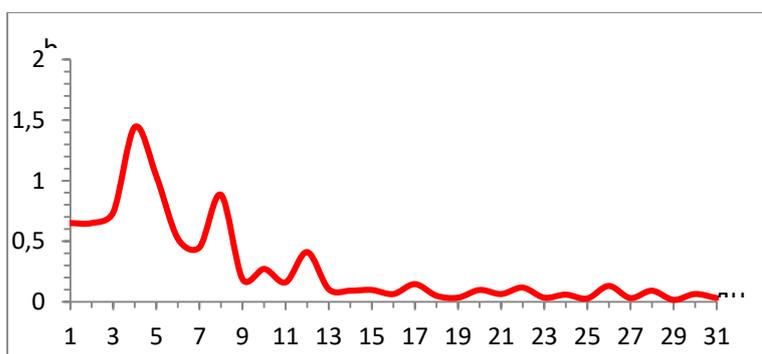


Рис. 8. Кривая значений максимумов коэффициента $b^2(t, x)$ для значений температуры для усредненного января за 1979–2018 гг. по всему региону

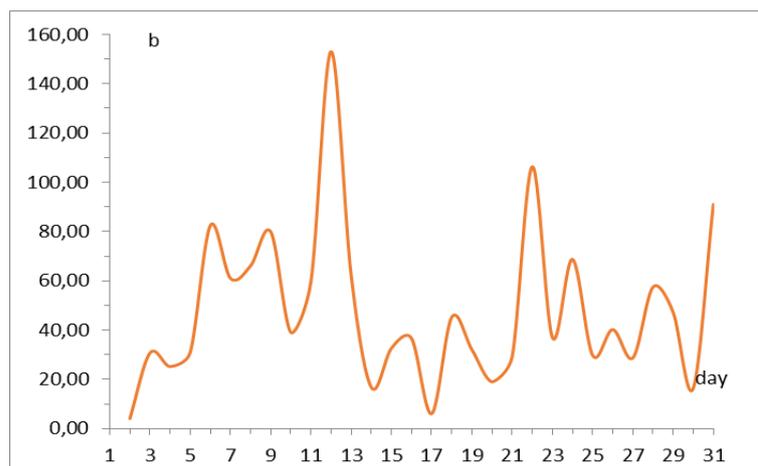


Рис. 9. Кривая значений коэффициента $b^2(t, x)$ для значений суммарного потока климатического декабря за 1979–2018 гг. по всему региону

Из приведенных иллюстраций видно, что для климатического декабря достаточно хорошо выражена синоптическая изменчивость, период которой составляет приблизительно 10 суток. Этот результат не противоречит известной синоптической изменчивости потоков тепла, определяемой циклонической активностью, которая составляет примерно 3–5 суток. Коэффициенты $a(t, X)$ и $b^2(t, x)$ отражают последовательную изменчивость двух дней подряд, что определяет период около 10 суток.

В исследовании были также получены аппроксимирующие функции $A(t, X)$ и $B(t, x)$ для значений климатического года за весь период исследований и на всем пространстве Северной Атлантики (10° – 80° с. ш.) с пространственным разрешением 14 км. Эти функции позволяют получить, как результат, численную оценку изменчивости случайного процесса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В работе показано, что в многолетней изменчивости максимумов (за 40 лет) по акватории приводной температуры воздуха заметно присутствует 11-летний цикл, обусловленный известными в природе циклами солнечной активности. При этом не выявлено тенденций к росту этих максимумов за период 40 лет. Для вычисленных коэффициентов средней диффузии за климатический январь выявлены также синоптические колебания порядка 3–5 дней, которые хорошо видны

на графиках. Такие закономерности ранее не были известны и выявлены с помощью нового метода исследования на основе анализа больших данных, массивы которых формируются из наблюдений и реанализа в рамках исследований мирового океана. Результаты могут быть использованы для аналитического исследования многолетнего поведения изучаемых процессов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа представлена в рамках выполнения темы НИР 0063-2019-0003 ФИЦ ИУ РАН и темы НИР 0128-2021-0002 ИО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gavrikov A., Gulev S., Markina M., Tilinina N., Verezemskaya P., Barnier B., Dufour A., Zolina O., Zyulyaeva Y., Krinitskiy M., Okhlopkov I., Sokov A.* RAS-NAAD: 40-yr High-Resolution North Atlantic Atmospheric Hindcast for Multipurpose Applications (New Dataset for the Regional Mesoscale Studies in the Atmosphere and the Ocean) // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2020. V. 59, issue 5. P. 793–817. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-19-0190.1>.
2. *Kendall M., Stuart A., Ord J.K.* The Advanced Theory of Statistics. Volume 3: Design and Analysis, and Time-Series. Fourth edition Hardcover – March 13, 1983.
3. *Belyaev K., Mikhaylov G., Salnikov A., Tuchkova N.* Seasonal and Decadal Variability of Atmosphere Pressure in Arctic, its Statistical and Temporal Analysis // *CEUR Workshop Proceedings*, M. Jeusfeld c/o Redaktion Sun SITE, Informatik V, RWTH Aachen (Aachen, Germany). 2020. V. 2784. P. 51-61. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2784/rpaper05.pdf>.
4. *Гухман И., Скороход А.* Введение в теорию случайных процессов. М.: Наука, 1965. 655 с.
5. *Назаров А., Терпунов А.* Теория вероятностей и случайных процессов. Изд-во Томского госуниверситета, 2010. 204 с.
6. *Risken H.* The Fokker–Planck Equation: Methods of Solutions and Applications. Springer. 1984. 452 p.

STATISTICAL ANALYSIS OF OBSERVATION DATA OF AIR-SEA INTERACTION IN THE NORTH ATLANTIC

N. P. Tuchkova¹ [0000-0001-5357-9640], K. P. Belyaev² [0000-0003-2111-2709],

G. M. Mikhaylov³ [0000-0002-4535-7180]

^{1, 2, 3}*Dorodnicyn Computing Center FRC CSC of RAS, Vavilov str., 40, 11933, Moscow*

²*Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Nahimovskiy pr., 36, 117218, Moscow*

¹natalia_tuchkova@mail.ru, ²kosbel55@gmail.com, ³gmickail@ccas.ru

Abstract

The observational data for 1979-2018 in the North Atlantic region are analyzed. These data were obtained as a result of the implementation of the project of the Russian Academy of Sciences for the study of the atmosphere in the North Atlantic (RAS-NAAD). The dataset provides many surface and free atmosphere parameters based on the sigma model and meets the many requirements of meteorologists, climatologists and oceanographers working in both research and operational fields. The paper analyzes the seasonal and long-term variability of the field of heat fluxes and water surface temperature in the North Atlantic. Schemes for analyzing diffusion processes were used as the main research method. Based on the given series of 40 years in length from 1979 to 2018, such parameters of diffusion processes as the mean (process drift) and variance (process diffusion) were calculated and their maps and time curves were constructed. Numerical calculations realized on the Lomonosov-2 supercomputer of the Lomonosov Moscow State University.

Keywords: time series analysis, climatic seasonal cycle, maximum and minimum heat fluxes and temperature values within a climatic year.

REFERENCES

1. Gavrikov A., Gulev S., Markina M., Tilinina N., Verezemskaya P., Barnier B., Dufour A., Zolina O., Zyulyaeva Y., Krinitskiy M., Okhlopkov I., Sokov A. RAS-NAAD: 40-yr High-Resolution North Atlantic Atmospheric Hindcast for Multipurpose Applications (New Dataset for the Regional Mesoscale Studies in the Atmosphere and the Ocean) // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2020, V. 59, issue 5. P. 793–817. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-19-0190.1>.

2. Kendall M., Stuart A., Ord J.K. The Advanced Theory of Statistics. V. 3: Design and Analysis, and Time-Series. Fourth edition Hardcover – March 13, 1983.

3. Belyaev K., Mikhaylov G., Salnikov A., Tuchkova N. Seasonal and Decadal Variability of Atmosphere Pressure in Arctic, its Statistical and Temporal Analysis // CEUR Workshop Proceedings, M. Jeusfeld c/o Redaktion Sun SITE, Informatik V, RWTH Aachen (Aachen, Germany), 2020. V. 2784. P. 51-61.
URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2784/rpaper05.pdf>.

4. Gihman I., Skorohod A. Vvedeniye v teoriyu sluchajnyh processov. M.: Nauka, 1965. 655 p.

5. Nazarov A., Terpunov A. Teoriya veroyatnostej i sluchajnyh processov. Izdvo Tomskogo Gosuniversiteta. 2010. 204 p.

6. Risken H. The Fokker–Planck Equation: Methods of Solutions and Applications. Springer. 1984. 452 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



ТУЧКОВА Наталья Павловна – старший научный сотрудник Вычислительного центра им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН, кандидат физ.-мат. наук, окончила ВМиК МГУ им. М.В. Ломоносова. Специалист в области алгоритмических языков и информационных технологий.

Natalia Pavlovna TUCHKOVA – senior researcher of Dorodnicyn computing center FRC SCS RAS, PhD in physics with a math degree, graduated from CS Faculty of Lomonosov MSU. The expert in the field of algorithmic languages and information technologies.

email: natalia_tuchkova@mail.ru

ORCID: 0000-0001-5357-9640



БЕЛЯЕВ Константин Павлович – ведущий научный сотрудник Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН и ФИЦ ИУ, доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры теории вероятностей и статистики ВМиК МГУ им. М.В. Ломоносова. Сфера научных интересов – математическое моделирование и усвоение данных наблюдений, статистический анализ натурных данных.

Konstantin Pavlovich BELYAEV – leading scientist of Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Science. Doctor of science, professor of Dept. of Applied Math and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University. Research interests – math. modelling and data assimilation, statistical analysis of natural data.

email: kosbel55@gmail.com

ORCID: 0000-0003-2111-2709



МИХАЙЛОВ Гурий Михайлович – ведущий научный сотрудник Вычислительного центра им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН, кандидат физ.-мат. наук. Сфера научных интересов – архитектура вычислительных систем и сетей, вычислительные и информационные технологии.

Gury Mikhaylovich Mikhaylov – leading scientist of Dorodnicyn computing center FRC SCS RAS, PhD in physics with a math degree. Research interests include architecture of computing systems and networks, computing and information technology.

email: gmickail@ccas.ru

ORCID: 0000-0002-4535-7180

Материал поступил в редакцию 30 января 2023 года