

УДК 519.6+519.2

## РАЗДЕЛЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОТОКОВ ТЕПЛА В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ НА РАЗЛИЧНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ И ИХ АНАЛИЗ

Н. П. Тучкова<sup>1</sup> [0000-0001-5357-9640], К. П. Беляев<sup>2</sup> [0000-0003-2111-2709],  
Г. М. Михайлов<sup>3</sup> [0000-0002-4535-7180], К. А. Ромашина<sup>4</sup> [0009-0002-3124-2646]

<sup>1-3</sup>Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН,  
г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, г. Москва, Россия

<sup>4</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
г. Москва, Россия

<sup>1</sup>ntuchkova@frccsc.ru, <sup>2</sup>kbelyaev@frccsc.ru, <sup>3</sup>gmihaylov@frccsc.ru,

<sup>4</sup>romashinaka@my.msu.ru

### **Аннотация**

Изучено распределение потоков тепла в Северной Атлантике, рассчитанное по схеме стохастического разностного уравнения, а именно по авторегрессионной схеме первого порядка со случайными коэффициентами. Использована база данных ERA 5, содержащая геофизические данные за 40 лет, с 1979 по 2018 г. Коэффициенты для последовательности авторегрессии определены на основе этих данных ранее и показано, что условия на коэффициенты обеспечивают существование и единственность решения этого разностного уравнения. Метод расчета распределений основан на последовательном интегрировании с использованием авторегрессионной схемы. Выполнены численные эксперименты и проведен их анализ. Установлено, что теоретически рассчитанные распределения хорошо соответствуют своим эмпирическим аналогам. Кроме того, при разбиении исходного временного ряда на выделенное среднее (тренд) и остаток, последний проанализирован как стационарный случайный процесс. Построены выборочные корреляционные функции и показано, что они хорошо аппроксимируются известными аналитическими выражениями, которые допускают фильтрацию и прогноз искомого процесса в явном виде. Численные расчеты выполнены на суперкомпьютере «Ломоносов-2» Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

*Ключевые слова:* анализ данных наблюдений, диффузионный стохастический процесс, изменчивость теплового потока, уравнение Фоккера – Планка – Колмогорова, стохастическое разностное уравнение, уравнение Фредгольма.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Настоящее исследование посвящено проблеме прогнозирования состояния среды на основе многолетних наблюдений характеристик тепловых потоков. Задача анализа характеристик окружающей среды, накопленных в базах данных, многократно возникает при необходимости принимать решения о проектировании технологических процессов, таких как бурение скважин, постройка прибрежных сооружений и т. п. Для зоны Северной Атлантики важно получить механизм оценки и прогноза перемещения тепловых масс, поскольку эти характеристики влияют на погодные условия в других регионах.

Использование значений характеристик, напрямую записанных при наблюдении, не принято в научном сообществе, поскольку там присутствуют лакуны и ошибки. Все данные наблюдений проходят этапы предобработки, прежде чем попадают в соответствующие базы. Эти работы включают выявление ошибочных значений, заполнение лакун, интерполяцию на регулярную расчетную сетку и т. д. Именно такие данные наблюдений, которые прошли предварительную обработку (реанализ) и содержат информацию о температуре, давлении над поверхностью моря и некоторые другие характеристики состояния среды, загружены в базу данных ERA5 [1]

ERA5 – это пятое поколение атмосферного реанализа глобального климата, охватывающее период с января 1940 г. по настоящее время. В настоящем исследовании использованы данные ERA5 теплового потока и температуры, проведены статистические эксперименты с ними, получены прогностические кривые, при этом использованы результаты, полученные для коэффициентов диффузии и переноса на предыдущих этапах нашей работы с этими массивами.

## ПРЕДШЕСТВУЮЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И АНАЛОГИЧНЫЕ РАБОТЫ

Наши ранние исследования [2, 3] позволили установить количественные и качественные закономерности распределения потоков тепла в регионе Северной Атлантики за рассматриваемый период времени. На основе анализа случайных процессов, заданных стохастическим дифференциальным уравнением (уравнением Ито), аппроксимации данных наблюдений и решения уравнения Фоккера – Планка – Колмогорова (ФПК) [3, 4] была описана эволюция вероятностного распределения тепла в океане. Были получены массивы коэффициентов сдвига и диффузии в каждой точке расчетной сетки (550 x 550) за весь период изучаемого времени (1979–2018 гг.) [5].

В настоящей работе использована модель представления исходного временного ряда в каждой точке пространства в виде стохастического уравнения Ито

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

где  $X(t)$  – изучаемый процесс, в этом случае поток тепла, рассматриваемый в момент времени  $(t)$ ;  $a(t, X)$ ,  $b(t, X)$  – соответственно коэффициенты сноса и диффузии для рассматриваемого процесса, метод их определения представлен в работах [2, 3], коэффициенты зависят от времени и от самого процесса. Таким образом, эти коэффициенты априори предполагаются случайными величинами.

Символом  $dW$  обозначен гауссовский «белый шум», т. е. гауссовский случайный процесс, независимый от процесса  $X(t)$ , со средним значением процесса, равным нулю, и дисперсией  $dt$ .

Исследования, связанные с изучением характеристик геофизических процессов, регулярно проводятся различными научными группами и для разных регионов. Использование базы данных ERA5 специалистами [6] также составляет одну из основ для анализа и сравнения методов анализа характеристик состояния среды. В регулярных отчетах [7, 8] представлены результаты прогнозов и численных экспериментов по моделированию поведений изучаемых характеристик. В [7] также дана информация, полученная при изучении низкочастотной изменчивости и тенденций изменения температуры и влажности приземного воздуха на основе ERA5 и других наблюдений. Построенные глобальные карты

приземной температуры воздуха позволили авторам [7] сделать вывод о том, что качество данных ERA5 согласуется с результатами аналогичных наблюдений.

Ниже представлены практические результаты, полученные на основе теоретических предположений, подтвержденных аналитическими выкладками и проиллюстрированных графическими сравнениями.

### СТАТИСТИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ИЗ БАЗЫ ДАННЫХ ERA5

Из формулы (1) легко получить выражение для распределения случайного процесса  $X(t)$  в следующем виде:

$$\begin{aligned} P(X(t+dt) < x) &= P_{n+1}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} P(X_{n+1} = x | X_n = u) dP_n(u) = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \Phi\left(\frac{x-u-a_{n+1}(u)}{b_{n+1}(u)}\right) dP_n(u). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь рассмотрен разностный аналог исходного стохастического дифференциального уравнения (1), где выражение  $dX(t)$  заменено соответственно на разность  $X_{n+1} - X_n; n=0,1,\dots$ ; коэффициенты  $a(t, X), b(t, X)$  – на  $a_{n+1}(X), b_{n+1}(X)$ , а вместо случайного процесса  $dW$  рассмотрена случайная величина, имеющая распределение Гаусса с нулевым средним, единичной дисперсией и независимая от величины  $X_n$ . Теперь в выражении (2) значение  $P_{n+1}(x)$  будет вероятностью события  $P(X(t+dt) < x)$ , а  $\Phi(x)$  – стандартная функция распределения Гаусса. Отметим, что для определенности сами случайные величины будем обозначать далее прописными буквами, а их значения – строчными.

Далее обсудим результаты статистических экспериментов с данными наблюдений из базы ERA5. Вычисления были выполнены с использованием библиотеки пакета языка Python 5. На базе статистически построенной эмпирической функции распределения последовательно были найдены новые распределения по формуле (2). Значения коэффициентов  $a_n(u), b_n(u)$  в интегральных выражениях (2) были взяты из наших предыдущих работ [5]. Начальное условие

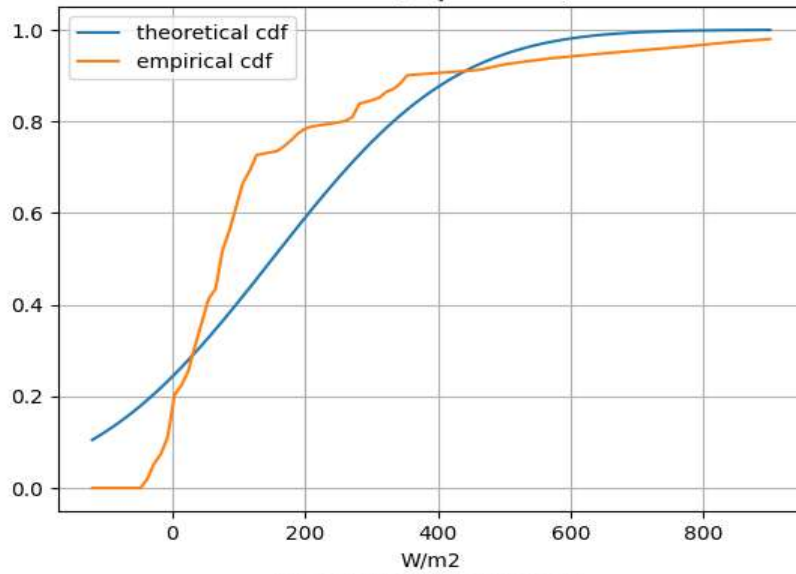
$P_0(x)$  было задано непосредственно из наблюдений, т. е. была построена эмпирическая функция распределения наблюдений (потоков тепла) на некоторый момент времени  $t_0$ .

База ERA5 содержит наблюдения не только о тепловых потоках, но и о температуре поверхности моря (SST), давлении на поверхности моря (SSP) и ряд других характеристик. Поскольку тепловой поток сильно зависит от SST, мы выбрали различные значения SST и рассматривали тепловые потоки при этих значениях SST по всей области (Северная Атлантика). Таким образом, в двумерной совместной функции распределения SST и теплового потока рассматривалось маргинальное распределение теплового потока для заданного значения SST. Подробности этого подхода можно найти в работе [2].

Для SST были выбраны множества минимальных, средних и максимальных SST по региону Северной Атлантики, и изучалось распределение теплового потока при выбранных значениях SST. Начальным днем  $t_0$  было выбрано 1 января 1999 г. На рис. 1 показано временное поведение распределения теплового потока на 2 января и 6 января 1999 г. Теоретическое распределение отмечено синим цветом, а эмпирическое, построенное непосредственно из базы данных ERA5 – желтым.

Из рис. 1 видно, что теоретическое распределение достаточно хорошо соответствует эмпирическому, особенно в «хвостовой зоне». Максимальное отклонение наблюдается в средней зоне, но здесь следует отметить, что наблюдения не являются гладкими, их пространственное поведение выглядит «грубым», «игольчатым». Со временем это отклонение демонстрирует тенденцию к уменьшению и сглаживанию.

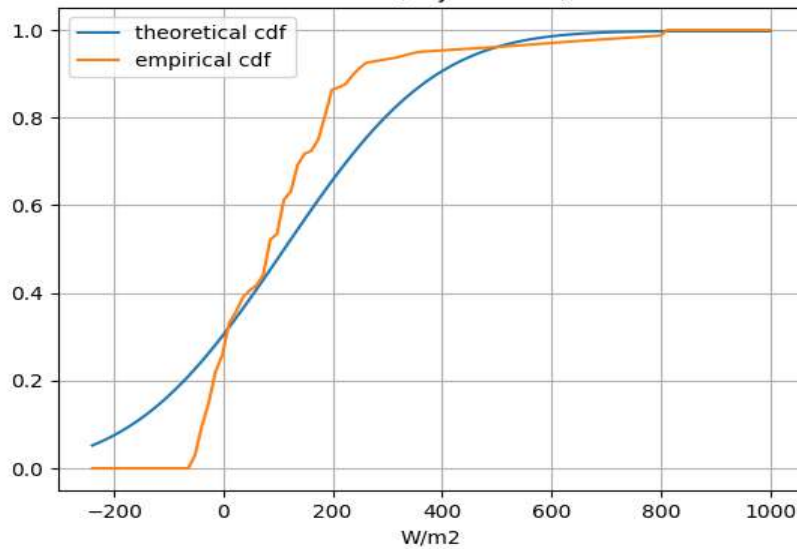
heat fluxes cdf at  $277^{\circ}\text{K} < T < 282^{\circ}\text{K}$ , 2 jan 1999 (interval from -67 to -64  $\text{W/m}^2$ )



MSE: 0.011655501339935224  
The cdf does not fit to a normal distribution  
The sample does not fit the theoretical distribution (p-value = 0.00)

(a)

heat fluxes cdf at  $276^{\circ}\text{K} < T < 281^{\circ}\text{K}$ , 6 jan 1999 (interval from -67 to -64  $\text{W/m}^2$ )

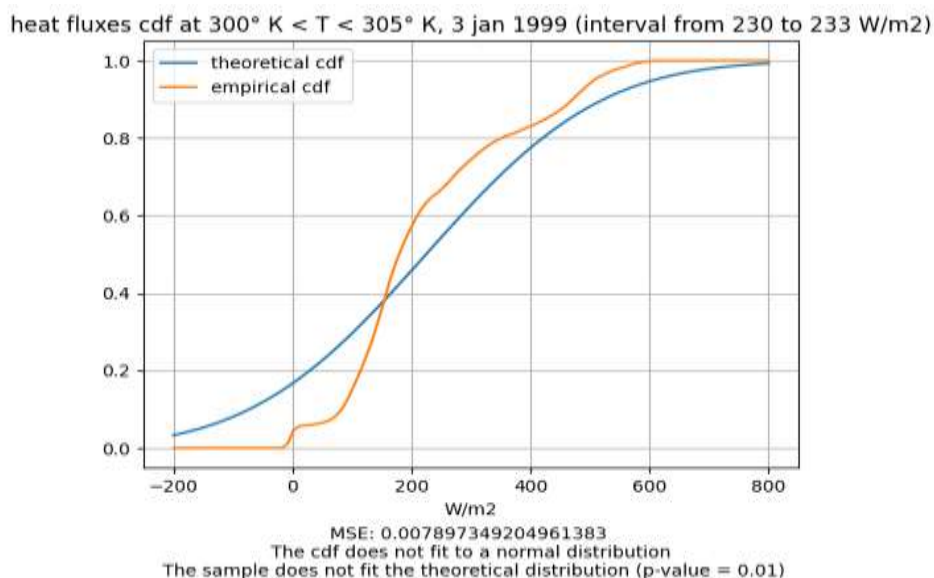


MSE: 0.008081035032155456  
The cdf does not fit to a normal distribution  
The sample does not fit the theoretical distribution (p-value = 0.00)

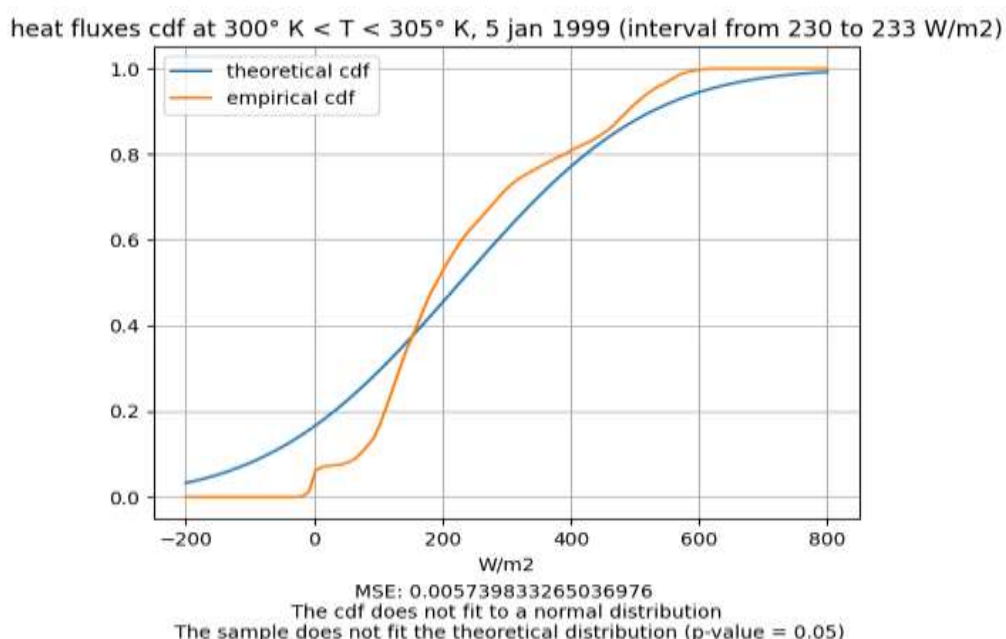
(б)

Рис. 1. Распределение теплового потока при минимальном значении SST: (а) для 2 января и (б) для 6 января 1999 г. Синяя кривая – модельное распределение, оранжевая кривая – наблюдаемое распределение.

Похожее, но не идентичное поведение функций распределения можно увидеть для потоков с максимальным SST (рис. 2). Кроме того, эмпирические кривые для тепловых потоков с максимальным SST менее хаотичны и «игольчатые», чем на рис. 1.



(a)

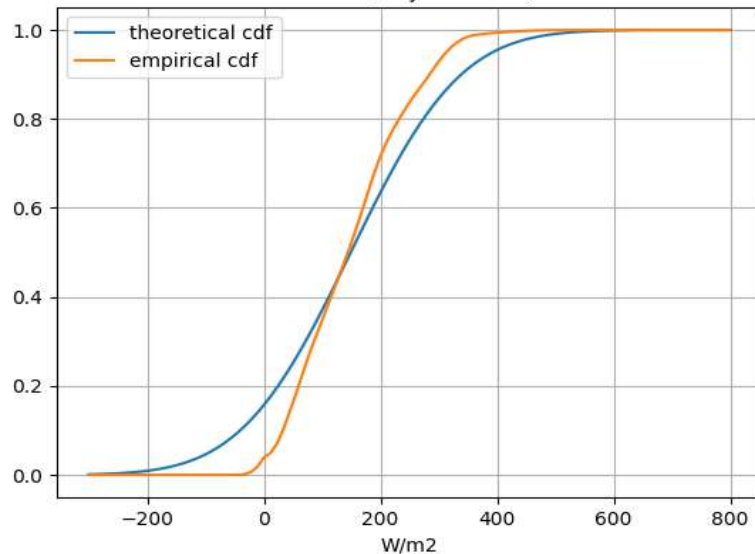


(б)

Рис. 2. Распределение теплового потока при максимальном значении SST: (а) для 3 января и (б) для 5 января 1999 г. Синяя кривая – модельное распределение, оранжевая кривая – наблюдаемое распределение.

На рис. 3 показана функция распределения теплового потока для среднего значения SST. Здесь наблюдается почти идеальное совпадение.

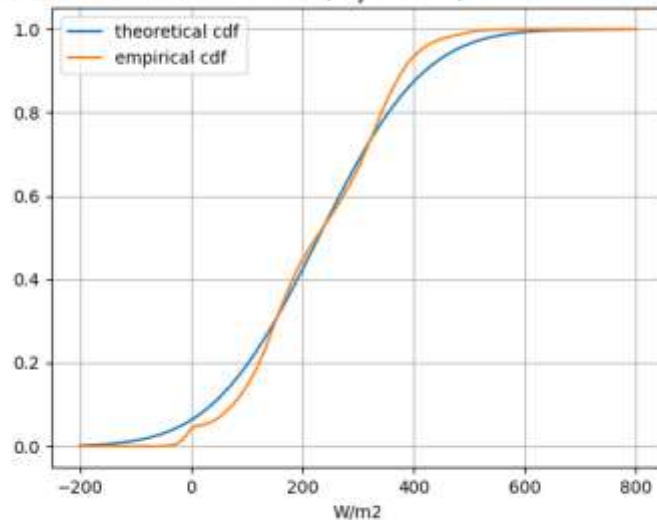
heat fluxes cdf at  $291^{\circ}\text{K} < T < 296^{\circ}\text{K}$ , 2 jan 1999 (interval from 230 to 233  $\text{W/m}^2$ )



MSE: 0.0028409476105325077  
The cdf does not fit to a normal distribution  
The sample fit the theoretical distribution (p-value = 0.23)

(a)

heat fluxes cdf at  $291^{\circ}\text{K} < T < 296^{\circ}\text{K}$ , 6 jan 1999 (interval from 230 to 233  $\text{W/m}^2$ )



MSE: 0.0007616377508906033  
The cdf does not fit to a normal distribution  
The sample fit the theoretical distribution (p-value = 0.41)

(б)

Рис. 3. Распределение теплового потока при среднем значении SST: (а) для 2 января и (б) для 6 января 1999 г. Синяя кривая – модельное распределение, оранжевая кривая – наблюдаемое распределение.

Если в начале расчетов все еще имелось видимое отклонение в середине кривых, несмотря на то что общее среднеквадратичное отклонение довольно мало, всего около  $10^{-3}$  и в несколько раз меньше, чем на рис. 1 и 2, то со временем это отклонение падает и достигает значений порядка  $10^{-4}$ . В «хвостовой зоне» на обоих краях расстояние между желтой (наблюдаемое распределение) и синей (модельное распределение) кривыми становится почти пренебрежимо малым. Эти две кривые очень хорошо совпадают и удовлетворяют критерию Колмогорова с порогом 0.05.

Кроме того, можно утверждать, что для среднего SST (по всей области), где значение вероятности SST максимально, соответствие распределению теплового потока намного лучше, чем для менее вероятностных (по SST) зон. Теоретически и физически это понятно: численное моделирование по уравнению (3) более вероятно для более часто реализуемых процессов.

### РАЗДЕЛЕНИЕ РЯДА НА ТРЕНД И ОСТАТОК

Из формулы (1) или, точнее из ее разностного аналога (2) можно получить выражение для наблюдаемого ряда с удаленным средним (трендом)

$$\bar{X}_{n+1} = X_{n+1} - \sum_{i=0}^n a_i(X_i) . \quad (3)$$

Для этого вычислим среднее значение на  $n$ -м шаге и последовательно удалим его из наблюдений. Остаток  $\bar{X}_{n+1}$  имеет смысл рассматривать как стационарный случайный процесс, его корреляционная функция зависит только от значений  $E(\bar{X}_{n+k} \bar{X}_n) = C(k)$ , где  $E$  означает математическое ожидание по мере, порожденной этим случайным процессом.

Для оценки корреляционной функции построим выражение

$$C(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{X}_i(n+k) \bar{X}_i(n) . \quad (4)$$

*Замечание.* В случае, когда значения  $n+k$  превышают длину ряда (выходят за правый конец), недостающие значения добавляем с начала ряда (левого его конца). Это стандартный прием для оценки стационарных рядов. Всего длина ряда равна  $n$ .

Корреляционные функции были построены для различных точек исходной сетки. Так как коэффициенты  $a_n(X)$  зависят от значений процесса  $X$ , а эти значения различны в разных точках сетки, полученные корреляционные функции будут соответствовать временным рядам, построенным в тех точках сетки, которым соответствуют коэффициенты  $a_n(X)$ . Примеры таких корреляционных функций показаны на рис. 4, откуда хорошо видно, что корреляционная функция действительно зависит только от разности и хорошо аппроксимируется аналитическим выражением

$$C(k) = \exp(-lk)(A \sin \omega k + B \cos \omega k). \quad (5)$$

Далее для каждой точки методом наименьших квадратов были подобраны оптимальные (в смысле минимума среднеквадратичного отклонения) значения  $l, A, B$ . Значение  $T$ , для которого выполнено равенство  $\omega = 2\pi / T$ , было непосредственно рассчитано как расстояние между ближайшими минимумами и максимумами корреляционной функции (рис. 4).

В настоящем исследовании всего таких точек сетки 550 x 550 для Северной Атлантики, поэтому выполнение соответствующих расчетов представляет собой задачу, требующую больших вычислительных ресурсов. Тем не менее в будущих исследованиях мы планируем построение и подробный анализ карты параметров  $l, A, B$ .

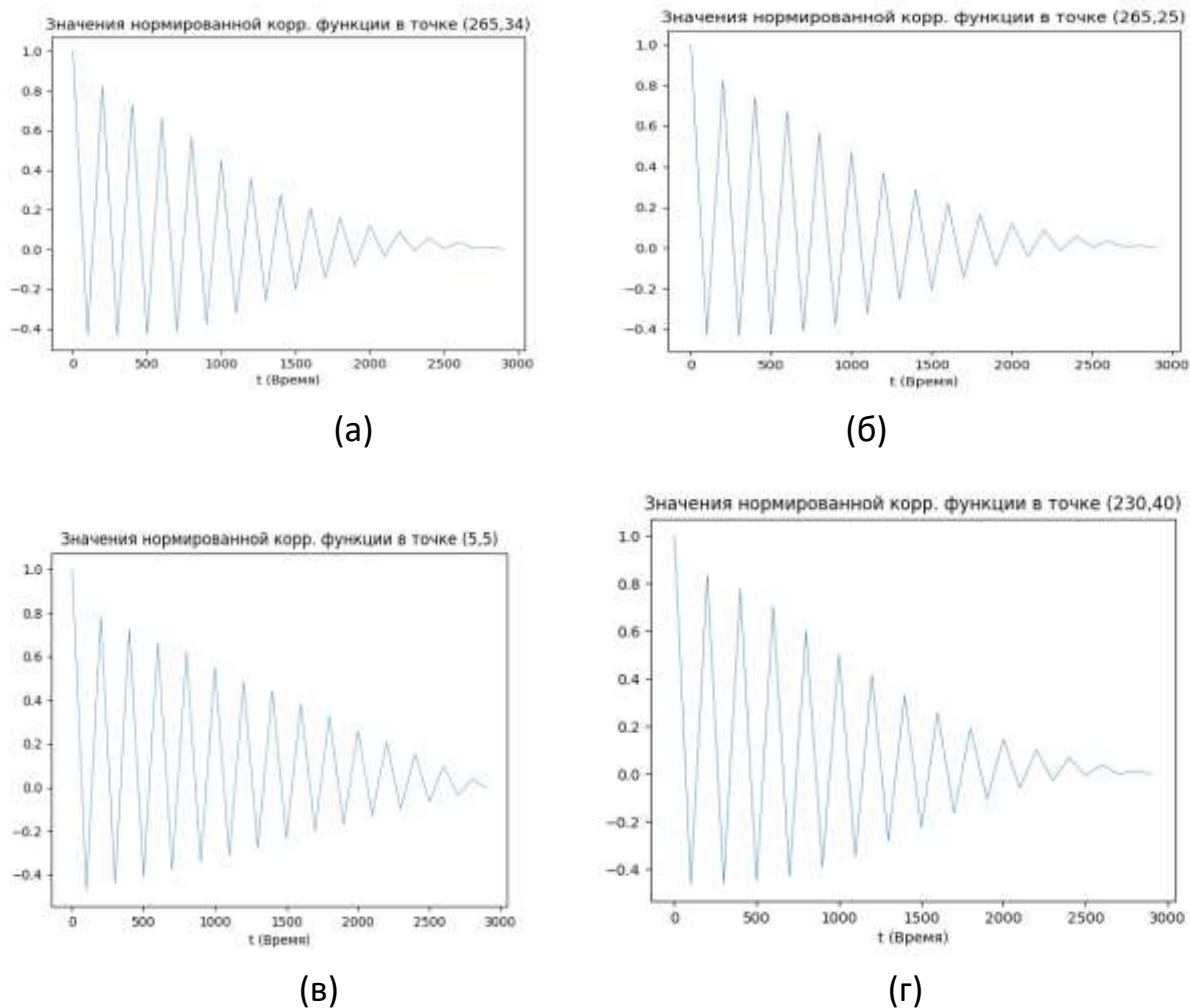


Рис. 4. Поведение корреляционных функций в различных точках рассматриваемой области, где координаты: (а) (265, 34); (б) (265, 25); (в) (5, 5); (г) (230, 40).

Из выражения (5) можно построить спектральные характеристики распределений остатков рядов  $\bar{X}_{n+1} = X_{n+1} - \sum_{i=0}^n a_i(X_i)$  по формулам [9]. В общем виде спектральная плотность

$$f(\lambda) = \int_0^{\infty} e^{ik\lambda} C(k) dk$$

будет иметь вид

$$f(\lambda) = \frac{A}{\lambda^4 + 2a\lambda^2 + b}$$

где коэффициенты  $A$ ,  $a$ ,  $b$  выражаются через параметры  $l, A, B$  с помощью формул (5) и, естественно, будут различными в различных точках сетки. Однако, используя спектральные характеристики, можно явным образом построить оптимальный линейный прогноз стационарного спектрального процесса в каждой точке и найти оценку дисперсии этого прогноза. Это тоже задача дальнейших исследований.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Для изучения распределения потоков тепла в Северной Атлантике была использована авторегрессионная схема первого порядка со случайными коэффициентами. Проведенное исследование показало возможность применения модельных расчетов для получения прогнозов, хорошо согласующихся с эмпирическими данными. Графики сравнения демонстрируют хорошее согласование полученных результатов. После удаления трендов в анализируемых рядах оценена корреляционная функция остатков и построены их спектральные характеристики.

Дальнейшие исследования предполагают применение аналогичного подхода для получения прогнозов с совместным учетом нескольких характеристик среды.

### **Благодарности**

Работа выполнена в рамках выполнения темы НИР «Математические методы анализа данных и прогнозирования» Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН (исполнители – Н. П. Тучкова, Г. М. Михайлов, К. П. Беляев) и темы FMWE-2024-0016 Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (исполнитель – Беляев К. П.).

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Hersbach H., et al.* The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. Vol. 146. No. 730. P. 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
2. *Ferrante M., Nualart D.* On the Markov property of a stochastic difference equation // Stochastic Processes and their Applications, 1994. Vol. 52. P. 239–250.

3. *Гухман И.И., Скороход А.В.* Введение в теорию случайных процессов. М.: Наука; 1977. 465 с.

4. *Самарский А.А.* Теория разностных схем. М.: Наука; 1977. 656 с.

5. *Belyaev K.P., Tuchkova N.P.* Analysis of spatiotemporal variability of the coefficients of stochastic differential equation of the heat fluxes in the North Atlantic in their modeling by stochastic process // *Lobachevskii J. of Math.* 2023. Vol. 44, No. 7. P. 2601–2606. <https://doi.org/10.1134/S1995080223070090>

6. *Parfitt R., Czaja A., Kwon Y.-O.* The impact of SST resolution change in the ERA Interim reanalysis on wintertime Gulf Stream frontal air-sea interaction // *Geophysical Research Letters.* 2017. Vol. 44. No 7. P. 3246–3254. <https://doi.org/10.1007/s00376-020-0072-0>

7. *Simmons A., et al.* Low frequency variability and trends in surface air temperature and humidity from ERA5 and other datasets // *ECMWF Technical Memoranda.* 2021. Vol. 881. <https://doi.org/10.21957/ly5vbtbfd>

8. Newsletter No. 183, Spring 2025. <https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/042025/81655-newsletter-no-183-spring-2025.pdf>.

9. *Яглом А.М.* Введение в теорию стационарных случайных функций // *УМН.* 1952. Т. 7. № 5 (51). С. 3–168.

---

## SEPARATION OF HEAT FLOW PROCESSES IN THE NORTH ATLANTIC INTO VARIOUS COMPONENTS AND THEIR ANALYSIS

N. P. Tuchkova<sup>1</sup> [0000-0001-5357-9640], K. P. Belyaev<sup>2</sup> [0000-0003-2111-2709],  
G. M. Mikhaylov<sup>3</sup> [0000-0002-4535-7180], K. A. Romashina<sup>4</sup> [0009-0002-3124-2646]

<sup>1-3</sup>*Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>4</sup>*Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

<sup>1</sup>ntuchkova@frccsc.ru, <sup>2</sup>kbelyaev@frccsc.ru, <sup>3</sup>gmihaylov@frccsc.ru,  
<sup>4</sup>romashinaka@my.msu.ru

### **Abstract**

The heat flux distribution in the North Atlantic calculated using a stochastic difference equation scheme, namely, a first-order autoregressive scheme with random coefficients, is studied. The ERA5 database, containing geophysical data for 40 years, from 1979 to 2018, is used. The coefficients for the autoregressive series were previously determined based on these data, and it is shown that the conditions on the coefficients ensure the existence and uniqueness of a solution to this difference equation. The method for calculating distributions is based on successive integration using an autoregressive scheme. Computational experiments are conducted and analyzed. Moreover, it is shown that the theoretically calculated distributions are in good agreement with their empirical counterparts. Further, after the division of the original time series into a distinguished mean (trend) and a residual, the latter is analyzed as a stationary random process. Selected correlation functions were calculated and it is shown that they are well approximated by known analytical expressions. Those approximations allow explicitly filtering and prediction of the process under study. Numerical calculations were performed on the Lomonosov-2 supercomputer at Moscow State University.

**Keywords:** *data analysis, diffusion stochastic process, heat flux variability, Fokker-Planck-Kolmogorov equation, stochastic difference equation, Fredholm equation.*

## REFERENCES

1. *Hersbach H., et al.* The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. Vol. 146. No. 730. P. 1999–2049.  
<https://doi.org/10.1002/qj.3803>
  2. *Ferrante M., Nualart D.* On the Markov property of a stochastic difference equation // Stochastic Processes and their Applications, 1994. Vol. 52. P. 239–250.
  3. *Gihman I.I., Skorohod A.V.* Vvedenie v teoriyu sluchajnyh processov. M.: Nauka, 1977. 465 s.
  4. *Samarskij A.A.* Teoriya raznostnyh skhem. M.: Nauka, 1977. 656 s.
  5. *Belyaev K.P., Tuchkova N.P.* Analysis of spatiotemporal variability of the coefficients of stochastic differential equation of the heat fluxes in the North Atlantic in their modeling by stochastic process // Lobachevskii J. of Math. 2023. Vol. 44. No. 7. P. 2601–2606. <https://doi.org/10.1134/S1995080223070090>
  6. *Parfitt R., Czaja A., Kwon Y.-O.* The impact of SST resolution change in the ERA Interim reanalysis on wintertime Gulf Stream frontal air-sea interaction // Geophysical Research Letters. 2017. Vol. 44, No. 7. P. 3246–3254.  
<https://doi.org/10.1007/s00376-020-0072-0>
  7. *Simmons A., et al.* Low frequency variability and trends in surface air temperature and humidity from ERA5 and other datasets // ECMWF Technical Memoranda. 2021. Vol. 881. <https://doi.org/10.21957/ly5vbtbfd>
  8. Newsletter No. 183, Spring 2025. <https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/042025/81655-newsletter-no-183-spring-2025.pdf>.
  9. *Yaglom A.M.* Vvedenie v teoriyu stacionarnykh sluchajnykh funktsiy // UMN. 1952. Vol. 7. No 5(51). S. 3–168.
-

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**ТУЧКОВА Наталия 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 at the Dorodnitsyn computing center FRC SCS RAS, PhD in physics and mathematics degree, graduated from CS Faculty of Lomonosov MSU. The expert in the field of algorithmic languages and information technologies.

email: ntuchkova@frcscs.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 натуральных данных.

**Konstantin Pavlovich BELYAEV** – leading researcher at the Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences. Doctor of science, professor at the Department of Applied Mathematics and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University. Research interests includes mathematical 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 researcher at the Dorodnicyn Computing Center FRC SCS RAS, PhD in physics and mathematics degree. Research interests include architecture of computing systems and networks, computing and information technologies.

email: gmihaylov@frccsc.ru;

ORCID: 0000-0002-4535-7180



**РОМАШИНА Ксения Алексеевна** – магистрант кафедры Математической статистики факультета ВМиК МГУ им. М. В. Ломоносова

**Kseniya Alekseevna ROMASHINA** – master's student at the Department of Mathematical Statistics of the CS Faculty of Lomonosov MSU.

email: romashinaka@my.msu.ru;

ORCID: 0009-0002-3124-2646

*Материал поступил в редакцию 19 января 2026 г.*