

А. А. О с и п о в а (Москва, ФИЦ ИУ РАН). **Об анализе случайных параметров динамико-стохастической модели потоков тепла между океаном и атмосферой в Северной Атлантике в 1979–2022 гг.**

УДК 519.25

DOI <https://doi.org/10.52513/08698325.2022.29.3.1>

Резюме: В докладе рассматриваются точечные оценки случайных коэффициентов стохастического дифференциального уравнения (СДУ) Ланжевена — вектора сноса и матрицы диффузии. Разработаны вычислительные процедуры для статистического анализа временной эволюции коэффициентов СДУ Ланжевена, определения их взаимосвязей, а также поведения их максимумов, средних и минимумов на временных окнах различных масштабов (дни, месяцы, годы), а также динамической визуализации на географических картах исследуемого региона. Численное моделирование для реальных пространственно-временных данных в Северной Атлантике за более чем сорокалетний период проведено с использованием высокопроизводительного вычислительного оборудования.

Ключевые слова: Стохастическое дифференциальное уравнение, уравнение Ланжевена, явные и скрытые потоки тепла, океан-атмосфера, ERA5, данные реанализа, статистические методы оценки.

Первые исследования среднегодового хода явных потоков тепла по данным реанализа базы ERA5 за 2010–2020 гг. с использованием стохастического дифференциального уравнения (СДУ) Ланжевена были проведены в статье [1]. В ней были изучены статистические закономерности внутригодовой и межгодовой изменчивости с различными масштабами усреднения: дневным, месячным, годовым. Также рассматривалось поведение экстремальных и средних потоков. В частности, показано существование положительного тренда максимума скрытого потока с течением времени.

В данной работе анализируются как явные, так и скрытые потоки, в том числе и совместно, на значительно более длинном временном интервале 1979–2022 гг. Предложены оригинальные методы оценивания векторного коэффициента сноса a и матричного коэффициента b СДУ Ланжевена, исследуется взаимовлияние этих величин, выявляются области преобладания диффузионной компоненты над параметром сноса, а также рассматривается поведение таких их характеристик, как минимумы, максимумы и средние значения.

Рассмотрим динамико-стохастическую модель вида

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

называемую стохастическим дифференциальным уравнением Ланжевена. В формуле (1) $X = (X_1(t), X_2(t))$ — случайный процесс, значения которого в фиксированный момент времени t имеют смысл вектора значений явного и скрытого потока в рассматриваемой географической точке, $a(t, X)$ и $b(t, X)$ — случайные коэффициенты сноса и диффузии, зависящие от времени и значения потока, $W(t)$ — винеровский процесс, не зависящий от процесса $X(t)$.

Для каждого фиксированного момента времени t точечные оценки $a(t, x)$ и $b(t, x)$ могут быть построены только на основе значения потока. Для построения оценок в момент времени $t + 1$ требуется на основе выборки по всей рассматриваемой географической области оценить вероятности перехода процесса $X(t)$ из множества значений в момент t в множество значений в момент $t + 1$.

В результате анализа полученных оценок было установлено, что максимумы динамической составляющей соответствуют направлению основного течения Гольфстрима, а диффузионная составляющая преобладает в центральных и южных районах Северной Атлантики. Общая динамика коэффициентов хорошо соответствует поведению основных течений в Северной Атлантике, усиливаясь в осенне-зимний период и ослабляясь в весенне-летний. Основной перенос потока в океане соответствует зонам струйных течений, а также приведены его количественная оценка и оценки его изменчивости.

В межгодовой изменчивости выделяется тренд для коэффициентов сноса и диффузии для максимумов по акватории, особенно для скрытого потока. Это вполне соответствует тенденции на глобальное потепление климата. При этом показано, что основной рост идет за счет увеличения скрытого потока — передачи влаги из океана в атмосферу. Установлено преобладание диффузионной компоненты процесса практически по всей акватории, за исключением Гольфстрима. Это подтверждает, что основное взаимодействие и передача энергии в системе «океан–атмосфера», кроме зоны Гольфстрима, происходит нерегулярным образом. Квадрат диффузионной компоненты показывает энергию этой передачи. Выявлена заметная корреляция между явными и скрытыми потоками, демонстрирующая адекватность полученных оценок.

Работа выполнялась с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования «Высокопроизводительные вычисления и большие данные» (ЦКП «Информатика» ФИЦ ИУ РАН, Москва).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект 22-11-00212.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев К. П., Королев В. Ю., Горшенин А. К., Антипов А. И., Имеев М. А., Кирюшкин Н. И., Лобовский М. А. Некоторые особенности внутригодовой изменчивости потоков тепла в Северной Атлантике. — Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 2021, т. 57, в. 6, с. 619–631. // Belyaev K. P., Korolev V. Yu., Gorshenin A. K., Antipov A. I., Imeev M. A., Kirushkin N. I., Lobovskii M. A. Some Features of the Intra-Annual Variability of Heat Fluxes in the North Atlantic. — Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2021, v. 57, is. 6, p. 619–631. (In Russian.)
2. Горшенин А. К., Королев В. Ю., Щербинина А. А. Статистическое оценивание распределений случайных коэффициентов стохастического дифференциального уравнения Ланжевена. — Информатика и ее применения, 2020, т. 14, в. 3, с. 3–12. // Gorshenin A. K., Korolev V. Yu., Shcherbinina A. A. Statistical Estimation of Distributions of Random Coefficients of the Langevin Stochastic Differential Equation. — Informatics and its Applications, 2020, v. 14, is. 3, p. 3–12.

UDC 519.25

DOI https://doi.org/10.52513/08698325_2022_29_3_1

Osipova A. A. (Moscow, Federal Research Center «Computer Science and Control» of the Russian Academy of Sciences, Lomonosov Moscow State University). **On analysis of random parameters of the dynamic-stochastic model of air-sea heat fluxes in the North Atlantic in 1979–2022.**

Abstract: The report presents point estimates of the random coefficients of the Langevin stochastic differential equation (SDE) — the drift vector and the diffusion matrix. Computational procedures have been developed for the statistical analysis of the temporal evolution of the Langevin SDE coefficients, determining their relationships, as well as the behavior of their maxima, averages, and minima on time windows of various scales (days, months, years), as well as dynamic visualization on geographical maps of the region under study. Numerical modeling for real spatiotemporal data in the North Atlantic over a period of more than forty years was carried out using high-performance computing equipment.

Keywords: Stochastic differential equation, Langevin equation, sensible and latent heat fluxes, ocean-atmosphere, ERA5, reanalysis data, statistical estimation methods.