УДК 551.465.7

# СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВНУТРИ- И МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЯВНЫХ И СКРЫТЫХ ПОТОКОВ ТЕПЛА В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ ЗА 1979—2021 гг.

© 2022 г. К. П. Беляев<sup>а, b, c</sup>, А. К. Горшенин<sup>b,</sup> \*, В. Ю. Королев<sup>b, c, d</sup>, А. Д. Плеханов<sup>c</sup>

<sup>а</sup>Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, Нахимовский проспект, д. 36, Москва, 117997 Россия <sup>b</sup>Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" РАН, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2, Москва, 119333 Россия <sup>c</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, стр. 52, Москва, ГСП-1, 119991 Россия <sup>d</sup>Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Ленинские горы, д. 1, стр. 52, Москва, ГСП-1, 119991 Россия <sup>e</sup>-mail: agorshenin@frccsc.ru Поступила в редакцию 30.03.2022 г. После доработки 20.07.2022 г. Принята к публикации 11.08.2022 г.

В работе анализируются статистические закономерности внутри- и межгодовой изменчивости явных и скрытых потоков тепла в Северной Атлантике, в том числе на основе выявления регрессионных зависимостей, при различных осреднениях временных рядов. Оцениваются различные характеристики потоков, такие как максимумы и минимумы по акватории, средние, медианы. На основе данных реанализа ERA5 за 1979–2021 гг. изучается эволюция этих величин в Северной Атлантике и сопоставляется поведением самих потоков тепла как от года к году, так и внутри осредненного климатического года. Показано, что существует положительный тренд в потоках, проведена оценка его параметров. Проанализирована пространственно-временная изменчивость экстремальных характеристик потоков – максимума и минимума – по расчетной области в фиксированные моменты времени.

Ключевые слова: потоки тепла, океан-атмосфера, статистические модели, Северная Атлантика **DOI:** 10.31857/S0002351522060049

#### введение

При изучении климатической изменчивости исследование базы данных реанализа различных геофизических характеристик представляет собой чрезвычайно важную и актуальную задачу, так как взаимодействие океана и атмосферы количественно выражается через потоки явного и скрытого тепла. На поверхности раздела атмосфера—океан турбулентные потоки тепла очень изменчивы на различных пространственно-временных масштабах и поэтому проблема их корректного количественного описания требует правильной постановки задачи.

Хорошо известны сложности, возникающих при вычислении потоков для больших пространственно-временных данных по известной формуле  $Q = q\vec{n}/ST$ , где Q – поток тепла, q – общее количество тепла,  $\vec{n}$  – единичный вектор в положительном направлении океан—атмосфера, или отрицательном, если поток идет из атмосферы в океан; S – площадь поверхности, на которой рассматривается этот поток, и T – время, за которое передается тепловая энергия. Поэтому на практике вместо данной формулы применяются аппроксимации, использующие представление потоков через характеристики сред, которые относительно легко можно измерить и/или посчитать [1, 2]: температуру воды, воздуха, скорости и направления ветра и ряд других. Для явных  $Q_h$  и скрытых  $Q_e$  потоков тепла обычно используются следующие соотношения, зависящие от параметров на границе раздела океана и атмосферы:

$$Q_h = c_p \rho C_T (T_w - T_a) V, \qquad (1)$$

$$Q_e = L\rho C_e(q_s - q)V.$$
<sup>(2)</sup>

Здесь  $T_w$  и  $T_a$  – температуры воды и воздуха соответственно, V – модуль скорости ветра, q – удельная влажность приводного воздуха,  $q_s$  – насыщенная удельная влажность над поверхностью воды, L – удельная теплота испарения,  $c_p$  – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении и его плотность  $\rho$ ,  $C_T$  и  $C_e$  – коэффициенты обмена теплом (число Шмидта) и влагой (число Дальтона), зависящие от скорости ветра и приводной стратификации. В рамках статьи используются готовые значения величин потоков  $Q_h$ ,  $Q_e$ из открытой базы данных реанализа ERA5 [3], которая формируется Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды.

Необходимо отметить, что задача формирования подобных наборов данных реанализа для больших пространственно-временных регионов с использованием выражений вида (1) и (2) представляет собой отдельное направление исследований. В частности, в статье [4] были представлены интерполированные данные с попутных судовых изменений за период 1980–1993 гг. в месячном осреднении с дальнейшей коррекцией смещения в работе [5], а в статье [6] аналогичные данные дополнены некоторыми оценками их достоверности. В работах [7–9] для для улучшения результатов использовались данные спутникового дистанционного зондирования для анализа наблюдений за 1981–2005 гг.

При исследовании изменчивости потоков явного и скрытого тепла изначально большое внимание уделялось механизмам межгодовых и междекадных изменений потоков [10–12]. Было показано, что изменчивость потоков в Северной Атлантике в значительной степени определяется атмосферой, хотя на более длительных масштабах может формироваться и за счет океанских процессов [13]. Последнее важно для анализа роли океана в формировании климатических изменений, поскольку температура поверхности океана продолжает возрастать даже тогда, когда приповерхностные температуры воздуха испытывают противоположные тенденции в течение нескольких лет [14, 15].

Роль различных масштабов в формировании долговременной изменчивости потоков исследовалась в работах [16—19]. Было показано, в том числе на основе данных реанализа, что механизмы формирования изменений средних и экстремальных величин потоков могут существенно различаться как регионально (западные пограничные течения и открытый океан), так и во времени. В работах по анализу потоков в океанских данных реанализа продемонстрировано, что именно турбулентные потоки вносят основной вклад в изменчивость общего потока на межгодовом масштабе времени [20].

Учитывая это, важно провести анализ изменчивости потоков с учетом их статистической структуры, в частности характеристик функций распределения и экстремальных величин. Это принципиально, поскольку при построении архива данных реанализа реально наблюдаемые данные "смешиваются" в том смысле, что не учитываются порядок их поступления и локализация. Поэтому, если игнорировать пространственное и временное расположение этих данных, а рассматривать только сами их величины, то с большой степенью достоверности такие наблюдения можно считать однородными, зависящими только от значений.

Отметим, что в рамках анализа подобных данных с использованием стандартных статистических моделей обычно предполагается, что исследуемые пространственно-временные наблюдения являются реализациями независимых и в некоторых случаях одинаково распределенных случайных величин. Это позволяет оценивать параметры вероятностных распределений [21], использовать классические подходы для временных рядов [22] и проводить сравнение совместных моделей океан—атмосфера со значениями реанализа в заданных точках [23, 24].

Предположение однородности существенным образом было использовано в статье [25], в которой изучался осредненный годовой ход данных реанализа для явных потоков тепла за период 2011-2020 гг., в том числе с учетом возможности его представлении в виде диффузионного случайного процесса, описываемого стохастическим дифференциальным уравнением Ланжевена. В ней использован метод представления данных в виде вариационного ряда в фиксированные моменты времени. А именно, все значения исследуемой величины потока разбиваются на L равных интервалов от минимального до максимального значений и внутри каждой ячейки, независимо от пространственной локализации, проводится их осреднение по пространству. Такой прием хорошо известен в анализе временных рядов, однако при анализе потоков тепла он видимо не применялся, и в этом смысле является оригинальным. Данный подход позволил представить временные ряды потоков тепла в виде реализации случайного процесса (уравнения Ланжевена) и оценить параметры этого процесса - его коэффициенты, а также исследовать важные характеристики вариационного ряда – минимум, среднее, медиану и максимум значений, их изменчивость во времени и при различных осреднениях по времени для явных потоков тепла.

В этой статье рассматриваются данные реанализа ERA5 за значительно более длительный период (1979—2021 гг.), причем как для явных, так и для скрытых потоков тепла. Цель данной работы состоит в изучении поведения экстремальных характеристик потоков (максимум, минимум) по области за весь период наблюдений в точках одноградусной сетки при различных осреднениях от суточных до годовых, а также средних значений по распределению (оно совпадает по построению со средним для области) и медиан. Кроме того, в работе проводится аппроксимация вероятностных распределений для каждого из типов потоков тепла по отдельности, а также исследуются их совместные распределения. Стандартные методы анализа временных рядов (выделение тренда, периодической составляющей, анализа остатка) дополняются совместным анализом пары явный-скрытый потоки, изучается их взаимосвязь, коэффициент корреляции. Пространственная зависимость этих рядов не учитывается, а временная, наоборот, предполагается существующей.

Статья организована следующим образом. Раздел 1 содержит описание данных реанализа, используемых в работе. В разделе 2 статистически исследуется поведение экстремальных характеристик потоков при различных осреднениях, а в разделе 3 — их разностей и среднеквадратических отклонений. Раздел 4 посвящен анализу совместных распределений максимумов и минимумов скрытых и явных потоков тепла. В заключительном разделе кратко обсуждаются полученные результаты, их океанографическая интерпретация и направления дальнейших исследований в этой области.

#### 1. МЕТОДОЛОГИЯ АНАЛИЗА И ОПИСАНИЕ ДАННЫХ

Как было отмечено во введении, ключевым при изучении скрытых и явных потоков тепла является предположение локальной однородности, а именно: статистические характеристики потоков при близких значениях самих потоков одинаковы в разных точках пространства. Таким образом, при достаточно мелком разбиении всего множества значений потоков от минимума до максимума в каждый момент времени можно провести осреднение внутри выбранной ячейки размера L по пространству и рассмотреть вариационный ряд значений потоков: максимумы, минимумы и другие порядковые статистики. В данной ситуации можно пренебречь зависимостью статистических характеристик от точки локализации, но не от значений. Это означает допущение, что значения потока, взятые в разных точках пространства, можно считать принадлежащими одной выборке (генеральной совокупности) с теми же статистическими характеристиками. Поэтому в данной работе для определения величин максимумов, минимумов и средних для потоков рассматриваются данные по всей акватории за изучаемый период времени (сутки, месяц, год), из которых затем формируются выборки для анализа, элементы которых считаются однородными.

Поведение экстремальных значений потоков тепла представляет значительный интерес, при этом традиционно рассматриваются экстремальные значения потоков тепла, привязанные к кон-

кретным регионам [19, 21, 26]. В частности, ранее были проведены исследования для данных до 1990 г. включительно по многолетнему анализу поверхностной температуры воды и ряду других характеристик [27]. Однако высокую актуальность представляет собой анализ многолетних рядов потоков тепла и экстремальных характеристик по данным этих рядов в глобальном океане, связанный с обновлением баз данных. Это дает возможность пересмотреть и возможно переосмыслить поведение максимальных и минимальных потоков тепла, а также средних и медианных значений.

В работе использованы значения скрытых и явных потоков тепла, заданные в узлах одноградусной сетки из 161х181 точек с временным разрешением шесть часов с января 1979 г. до декабря 2021 г. базы ERA5: всего проанализированы 29141 значений теплового потока в северной части Атлантического океана, широты – от 0 до 80, долготы – от –90 до 0.

В качестве основных статистических характеристик потоков тепла в Северной Атлантике для исследования выбраны: максимум и минимум по акватории, среднее значение по распределению и медиана, те есть такое значение потока, которое делит все распределение потока по акватории на равные части с вероятностью 0.5. Изучается изменчивость различных и расчеты по ним с различными осреднениями: сутки, месяц и год. Анализ проводился на посуточно усредненных данных (четыре измерения потока усреднялись в каждой точке). Дополнительно рассматривались среднеквадратичное отклонение потока и совместное распределение явного и скрытого потоков с аппроксимацией многомерным нормальным распределением. Для каждой них следуюшим образом строится временной ряд. В каждый фиксированный день рассматриваемого периода рассматривается выборка среднесуточных значений потоков во всех точках акватории. По полученной выборке рассчитываются значения статистик. В результате для каждой статистики получали одномерный временной ряд, соответствующий периоду в 43 года (одно измерение в день).

#### 2. ПОВЕДЕНИЕ МАКСИМУМА, МИНИМУМА, СРЕДНЕГО И МЕДИАНЫ ПОТОКОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ОСРЕДНЕНИЯХ

Анализ полученных временных рядов проводился с помощью одномерной линейной регрессии на различных временных интервалах (день, месяц, год). Весь период наблюдения разбивался на непересекающиеся интервалы заданной длины, затем проводилось усреднение значений временного ряда внутри каждого интервала, и после — под-



Рис. 1. Поведение максимума (синяя линяя), минимума (оранжевая), среднего (зеленая) и медианы (красная) потока тепла с суточным осреднением, явный и скрытый потоки.

гонка линейной регрессии методом наименьших квадратов к "укороченному" ряду.

Ниже приводятся графики временных рядов (рис. 1, 3 и 5), соответствующих линейных регрессий (рис. 2, 4 и 6) и величины подогнанных коэффициентов со значениями стандартных отклонений (табл. 1). При этом наибольший интерес представляет именно выявление направления изменения данных величин, а не полная статистическая подгонка линейной модели к указанным характеристикам. Результаты тестов свидетельствуют в пользу необходимости дальнейшего усложнения модели, однако для данной статьи подобная задача не ставилась.

На рис. 1 показано поведение максимума, минимума, медианы и среднего явного (рис. 1а) и скрытого (рис. 1б) потоков тепла по всей акватории за 43 года в суточном осреднении. Хорошо видно, что во всех величинах преобладает годовой ход, оценка его амплитуды для максимума составляет приблизительно 255 Вт/м<sup>2</sup>, для минимума она значительно меньше и составляет около 100 Вт/ м<sup>2</sup>, а для среднего по акватории и медианы эта величина совсем мала — около нуля. Но если для среднего еще можно говорить о годовом ходе, то для медианы такая изменчивость не наблюдается. Это важный результат, говорящий о симметрии распределений явных потоков тепла при суточном осреднении, то есть потоки в океан и из океана равновероятны, наблюдается баланс переходов явного тепла из океана и обратно.

Видно, что если поведение скрытого и явного потока близкое, то амплитуда изменчивости скрытого потока заметно больше, особенно для максимумов. При этом годовой ход выражен во всех без исключения характеристиках, а значения

(а) Линейная регрессия, явный поток



Рис. 2. Оценки линейных трендов при многолетнем поведении максимума (синяя линяя), минимума (оранжевая), среднего (зеленая) и медианы (красная) явного потока тепла в суточном осреднении.

медианы и среднего заметно отличаются от нуля, и имеют значения около 100 Вт/м<sup>2</sup>. Линейные тренды многолетнего поведения этих величин приведены на рис. 2.

Оценки коэффициента линейной регрессии максимальны для максимума явного потока (см. рис. 2а) и составляют примерно 10<sup>-4</sup> Вт/(м<sup>2</sup> (сут-ки)), а остальные величины имеют линейные ко-эффициенты на порядок меньше. Поэтому гово-

рить о многолетних трендах в явных потоках достоверно нельзя. Несколько другая картина наблюдается при анализе характеристик скрытого потока тепла.

Оценки многолетнего линейного тренда для максимума скрытого потока (см. рис. 26) при годовом осреднении представляют собой выраженную линейную зависимость около 0.03 Вт/(м<sup>2</sup> (сутки)), что на порядок больше, чем оценки трендов других

**Таблица 1.** Коэффициенты подогнанных линейных регрессий для различных осреднений скрытых и явных потоков тепла, Вт/м<sup>2</sup>

| Осреднение | Тип потока | Максимум         | Медиана        | Среднее          | Минимум         |
|------------|------------|------------------|----------------|------------------|-----------------|
| Суточное   | Явный      | $255.32\pm2.44$  | $9.36\pm0.06$  | $16.05\pm0.17$   | $-82.29\pm0.46$ |
|            | Скрытый    | $430.63\pm2.73$  | $84.27\pm0.29$ | $91\pm0.34$      | $-50.67\pm0.52$ |
| Месячное   | Явный      | $256.04\pm11.29$ | $9.37\pm0.3$   | $16.1\pm0.86$    | $-82.33\pm0.96$ |
|            | Скрытый    | $431.24\pm10.14$ | $84.32\pm1.39$ | $91.08 \pm 1.68$ | $-50.64\pm1.01$ |
| Годовое    | Явный      | $253.83\pm2.66$  | $9.37\pm0.13$  | $16\pm0.19$      | $-82.13\pm0.73$ |
|            | Скрытый    | $431.18\pm5.43$  | $84.44\pm0.6$  | $91.15\pm0.57$   | $-50.6\pm1.01$  |



Рис. 3. Поведение максимума (синяя линяя), минимума (оранжевая), среднего (зеленая) и медианы (красная) потоков в месячном осреднении: (а) явный поток, (б) скрытый поток.

величин, а те, в свою очередь, еще на порядок превосходят такие же оценки для явного потока. Заметна также межгодовая квазипериодическая изменчивость, особенно для максимума, о ней будет сказано ниже.

На рис. 3 приводятся графики рассматриваемых характеристик, но в месячном осреднении.

Из рис. 3 хорошо видно, что свойства потоков, установленные в суточном осреднении, характерны и для месячного осреднения, но с некоторыми особенностями. Так, амплитуды максимумов годового хода, явного и скрытого потоков очень близки (в суточном осреднении амплитуда максимума скрытого потока заметно превосходила аналогичную величину явного потока), а сами значения максимумов для скрытого потока на 20–25% больше явного. Также, как и для суточного осреднения, величины среднего и особенно медианы явного потока находятся около нуля и имеет слабо выраженный годовой ход, но для скрытого потока это не так: медиана имеет вполне заметное годовое колебание для скрытого потока и почти не имеет для явного, причем среднее ведет себя противоположным образом. Линейные тренды представлены на рис. 4.

Видно, что для явного потока коэффициенты линейной регрессии малы для всех рассматриваемых параметров, при этом для максимума ненулевой член появляется в четвертом знаке после запятой, а для остальных характеристик — только в пятом. То есть выраженной линейной изменчивости (линейного тренда) не наблюдается. Для скрытого потока для максимума линейная изменчивость видна и характеризируется коэффициен-

(а) Линейная регрессия, явный пото



Рис. 4 Аппроксимация линейной регрессией поведения максимума (синяя линяя), минимума (оранжевая), среднего (зеленая) и медианы (красная) потоков в месячном осреднении: (а) явный поток, (б) скрытый поток.

том регрессии со значимым третьим знаком после запятой (0.003 Вт/(м<sup>2</sup> (месяц))), остальные характеристики меняются мало — коэффициент регрессии имеет лишь четвертый значимый знак после запятой. Также, как и при суточном осреднении, среднее и медиана близки к нулю для явного потока, и имеют выраженный ненулевой сдвиг около 100 Вт/м<sup>2</sup> для скрытого потока.

При годовом осреднении есть некоторые отличия от вышеприведенных графиков, хотя в целом картина похожа. На рис. 5 приведены многолетние характеристики изменчивость явных и скрытых потоков тепла. Хорошо видно, что, как и на предыдущих рисунках, максимумы и минимумы явного и скрытого потоков имеют многолетние колебания, при этом и для явного, и особенно для скрытого потока прослеживается квазиодиннадцатилетний цикл.

На рис. 5 видны максимумы в районе 1987, 1998, 2011 и 2019 гг., однако оценить достоверно по этим данным невозможно – слишком корот-

кий ряд без явно выраженных пиков. Но если сопоставить с предыдущими данными, особенно в месячном осреднении, то эти пики становятся более достоверны, можно оценить амплитуду квази-одиннадцатилетнего цикла, она приблизительно равна 120 Вт/м<sup>2</sup>. При годовом осреднении почти незаметны колебания для медианы и среднего, слабо выражены также колебания для минимума.

Графики линейных трендов показаны на рис. 6. Как для явного, так и скрытого потоков существует заметный положительный линейный тренд для максимумов. Для явного потока коэффициент регрессии много больше, чем при суточном и месячном осреднении и составляет 0.08 Вт/(м<sup>2</sup> г) для явного потока, что почти в 3 раза превышает соответствующий коэффициент при месячном осреднении. Для скрытого потока этот коэффициент еще больше и составляет 1.25 Вт/(м<sup>2</sup> г) что статистически примерно в 3 раза превышает стандартное отклонение.



Рис. 5. Поведение максимума (синяя линяя), минимума (оранжевая), среднего (зеленая) и медианы (красная) потоков при годовом осреднении: (а) явный поток, (б) скрытый поток.

#### 3. ПОВЕДЕНИЕ РАЗНОСТИ МАКСИМУМОВ И МИНИМУМОВ ПОТОКОВ И СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКОГО ОТКЛОНЕНИЯ

В этом разделе рассмотрим поведение разности максимумов и минимумов для явных и скрытых потоков, а также поведение среднеквадратичного отклонения этих характеристик при различных осреднениях.

На рис. 7 показаны разности максимумов и минимумов явного и скрытого потоков в годовом

осреднении и соответствующие линейные регрессии для них. Хорошо видно, что есть заметный положительный линейный тренд для обоих потоков (соответственно, 335.96 и 481.78  $BT/M^2$ ), причем для скрытого потока в линейном приближении разность максимума и минимума возрастает более, чем на 10%, что превосходит пороговые значения достоверности, в частности, согласно правилу трех сигм в предположении гауссовости распределения отклонения. При этом для явных потоков гипотеза о нормальности по тесту Шапиро-

(а) Линейная регрессия, явный пото



Рис. 6. Линейные тренды для максимума (синяя линяя), минимума (оранжевая), среднего (зеленая) и медианы (красная) потоков при годовом осреднении: (а) явный поток, (б) скрытый поток.

Уилкса [28], используемого в силу малого объема анализируемой выборки, находится на границе принятия (Р-значение составляет около 0.05 при стандартном уровне значимости 0.05), при этом для скрытых потоков результат статистически заметно более значим — Р-значение равно 0.22.

Стандартное отклонение максимумов и минимумов и линии регрессии показаны на рис. 8. Видно, что оно тоже имеет положительный тренд (соответственно, 32.51 и 69.04 Вт/м<sup>2</sup> г), но значительно меньший, чем разность максимумов и минимумов. Это свидетельствует в пользу достоверности выявленного тренда для экстремальных величин.

#### 4. СОВМЕСТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКСТРЕМУМОВ ПОТОКОВ ТЕПЛА

В данном разделе изучается совместное распределение максимумов и минимумов потоков тепла за рассматриваемый период. За каждые 6 часов с 1979 по 2021 гг. выбирались одновременно значения максимумов и минимумов явного и скрытого потоков и строилась выборка помесячно из 360 (6 ×  $\times$   $30 \times 2$ ) значений максимумов и независимо минимумов. При этом, поскольку временная зависимость внутри месяца не рассматривалась, а при выборе значений максимумов и минимумов их пространственная локализация игнорировалась, как было отмечено в разделе 1, соответствующие значения можно считать независимыми. По этим выборкам строились двумерные нормальные распределения:

$$p(s_1, s_2) = \left(2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}\right)^{-1} \exp\left(-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\times\left[\left(\frac{s_1-\mu_1}{\sigma_1}\right)^2 - 2\rho\left(\frac{s_1-\mu_1}{\sigma_1}\right)\left(\frac{s_2-\mu_2}{\sigma_2}\right) - \left(\frac{s_2-\mu_2}{\sigma_2}\right)^2\right]\right),$$

где

*s<sub>i</sub>*, *i* = 1.2 – значения максимума (или минимума) явного и скрытого потока;



Рис. 7. Поведение разности (а) максимума и минимума, а также линий регрессии для них (б) для явного (голубая линяя) и скрытого (оранжевая) потоков в годовом осреднении.

 $-\mu_i, \sigma_i, i = 1, 2, -$  значения среднего (математического ожидания) и среднего квадратичного отклонения, соответственно, для максимумов и независимо для минимумов потоков;

 – ρ – коэффициент корреляции между максимумами (минимумами) явного и скрытого потоков.

Эти величины находились по стандартным формулам как несмещенные оценки с минимальной дисперсией [29]:

$$\mu_{i} = n^{-1} \sum_{j=1}^{n} s_{ij}; \quad \sigma_{i} = \sqrt{(n-1)^{-1} \sum_{j=1}^{n} (s_{ij} - \mu_{i})^{2}};$$
  
$$i = 1, 2; \quad \rho = \frac{\sum_{j,k} (s_{1j} - \mu_{1})(s_{2k} - \mu_{2})}{\sigma_{1}\sigma_{2}}.$$

В этих формулах  $s_{ij}$  – значения максимумов (минимумов) явного и скрытого потока (i = 1, 2) за период 1 месяц (j = 1, ..., 120). В результате расчетов строились эллипсы рассеивания в фазовом пространстве "поток-поток" с центрами в точках ( $\mu_1, \mu_2$ ) и наклоном оси эллипса с углом  $\alpha$  к оси Ox величины tg( $2\alpha$ ) =  $\frac{2\rho\sigma_1\sigma_2}{\sigma_1^2 - \sigma_2^2}$ . При этом случай  $\sigma_1 = \sigma_2$  соответствует вертикальному направлению оси эллипса. Ось Ox (горизонтальная) соответствует явному потоку, ось Oy (вертикальная) – скрытому потоку.

На рис. 9 показаны рассчитанные по вышеприведенным формулам эллипсы рассеяния за каждые 12 месяцев для максимумов потоков. Продемонстрированы результаты для двух граничных лет изучаемого периода — 1979 г. (рис. 9а) и 2021 г. (рис. 9б). Однако сделанные выводы справедливы

(а) Стандартное отклонение по акватории



Рис. 8. Стандартное отклонение (а) и линии регрессии (б) для максимумов и минимумов явного (голубая линяя) и скрытого (оранжевая) потоков в годовом осреднении.

и для всех остальных годов в рассматриваемом временном промежутке. Линии уровня проведены на уровне значимости 95%, то есть если наблюдаемые значения попадают вне этого уровня, то их вероятность меньше 0.05.

Из этого рисунка можно сделать несколько выводов. Во-первых, видно, что эллипсы заметно наклонены к оси *Ох* и сильно отличаются от круговых, что свидетельствует о сильной корреляции между потоками. Это понятно заранее, однако проведенные расчеты показывают количественную связь, в частности, с помощью коэффициента корреляции р. Во-вторых, эти эллипсы (совместное распределение максимумов потоков) имеет сильный сезонный ход: хорошо видно, что в летние месяцы (май–август) структура данных с разбиением на два непересекающихся кластера сильно отличается от других месяцев. С января по апрель и с сентября по декабрь данные ближе к нормальному распределению, а в летние месяцы отклонения становится более значимым: максимумы имеют ярко выраженное бимодальное распределение. В-третьих, практически все наблюдения хорошо вписываются в теоретический эллипс 95% уровня распределения Гаусса (красная линия на рис. 9). Вне этого эллипса располагается лишь малое число точек, что позволяет говорить о большей концентрации эмпирического распределения вокруг его центра, нежели предписывается классическим двумерным нормальным распределением.

Наконец, видна еще одна закономерность: если в 1979 г. эти эллипсы были близки к круговым и в основном вытянуты вдоль горизонтальной оси *Ox*, то в 2021 г. ситуация обратная: эллипсы стали более вертикальными, существенно отли-



**Рис. 9.** Поведение эллипсов рассеивания за 1979 (а) и 2021 (б) годы для совместного распределения максимумов явного и скрытого потока.



Рис. 10. Максимумы явного потока: кластеры (слева) и расположение (справа), июль 2021 г.

чающимися от круговых. Количественно это можно выразить через параметр эксцентриситета эллипса. Таким образом, необходимо использование иных семейств распределений — с этой точки зрения наибольшая перспектива открывается при использовании смешанных нормальных распределений.

На рис. 10 (слева) представлен пример совместного распределения максимумов явного и скрытого потоков в июле 2021 г. В летние месяцы облако точек разделяется по значениям явного потока на два кластера с бо́льшими (красные точки) и меньшими (синие) значениями максимума явного потока. На рис. 10 (справа) эти максимумы явного потока нанесены на географические карты (цвета соответствуют графику слева), кроме того, размер точек на графике справа учитывает частоту появления того или иного максимума, согласно графику слева, в соответствующей географической локации. Точки "красного" кластера в подавляющем большинстве случаев лежат в прибрежной зоне в районе Карибского моря и Гибралтарского пролива. Точки "синего" кластера чаще располагаются в зоне Гольфстрима непосредственно в Северной Атлантике, а также в Гудзоновом заливе (если дополнительно рассматривать материковую часть карты).

В качестве объяснения ежегодного формирования кластеров максимумов, наблюдаемых за весь период анализируемых данных с мая по август, можно предложить следующие соображения. Контраст температур континент-океан летом такой же или даже больше, чем океан-атмосфера в другие месяцы. Обычно океан теплее и идет передача из океана в атмосферу. Более того, летом относительно мелкие прибрежные участки прогреваются сильнее, поэтому максимальная передача тепла происходит около берега, что проявляется в сдвиге точек максимумов вправо в сторону увеличения координаты х, соответствующей явному потоку. Локализация максимума скрытого потока, как правило, не совпадает с расположением максимума явного потока. Особенно это заметно вдоль береговой линии, где явный поток летом заметно сильнее скрытого.

Поэтому наблюдается отмеченная выше кластеризация: дневные максимумы появляются около континента, а ночные максимумы в открытом океане в зоне теплых течений. В зимние месяцы этого не происходит, и распределение максимумов имеет выраженную одномодальную структуру.

На рис. 11 представлено совместное поведение минимумов, сделанное по тому же алгоритму, что и для максимумов, также за 1979 (рис. 11а) и 2021 (рис. 11б) годы. Поведение минимумов заметно отличается от поведения максимумов. Точки минимумов удовлетворительно описываются нормальными распределениями, однако реальные распределения, по-видимому, являются асимметричными, так как эмпирические распределения имеют явный скос одного из хвостов (см. выбросы вне эллипсов, расположенные внизу слева у каждого из них на рис. 11). Эллипсы заметно вытянуты, так как есть сильная взаимосвязь между явным и скрытыми потоками, но эта связь достаточно устойчивая как внутри, так и на межгодовом интервале. Какие-либо кластеры, в том числе и в летние периоды, не обнаружены.



Рис. 11. Поведение эллипсов рассеивания за 1979 (а) и 2021 (б) годы для совместного распределения минимумов явного и скрытого потока.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

1. При любом осреднении — суточном, месячном и годовом — анализ явного и скрытого потоков тепла показал, что заметен растущий линейный тренд у максимумов, минимумов и их разности для потоков тепла. Для максимума явного потока тепла этот тренд незначителен и не выходит за пределы доверительных границ, а для скрытого потока тепла он заметен и достоверно выделяется.

2. Среднее по распределению (совпадающего со средним по области) потоков явного и скрытого тепла и медиана меняются заметно меньше. Медиана явного потока близка к нулю при любом осреднении, что свидетельствует о равновесности явного потока: количество тепловой энергии, связанной с явным потоком тепла, равновелико передается при любом осреднении из океана и обратно. Средняя величина также близка к нулю, но имеет заметный годовой ход. Для скрытых потоков как медиана, так и среднее значение сдвинуты в положительную сторону и составляют около 100 Вт/м<sup>2</sup>, причем в отличие от явного потока среднее значение почти не меняется, а медиана имеет слабо выраженный годовой ход.

3. Среднеквадратичное отклонение максимумов и минимумов имеет слабо выраженную тенденцию к росту, но при этом заметно меньше, чем сами экстремумы, при этом количественные оценки соотношения изменения разности максимумов и минимумов к изменению дисперсии дают величины порога значимости более 0.9 по таблицам стандартного нормального распределения.

4. Построенные в соответствии с теоретическим двумерным гауссовым распределениям эллипсы рассеивания по наблюдаемым внутримесячным значениям максимумов и минимумов явного и скрытого потока показывают, что для максимумов имеет место заметный сезонный и годовой ход, совместное распределение максимумов потоков отлично от гауссового, особенно в летние месяцы (май-август), когда наблюдается кластеризация, то есть явно выраженное бимодальное распределение. Сами эллипсы меняют свою форму, наклон к горизонтальной оси меняется, что свидетельствует о росте скрытой части потока и его увеличении в межгодовой изменчивости. Для минимумов это не наблюдается, совместное распределение остается близким к гауссовым как внутри года, так и при межгодовой изменчивости. При этом внутри теоретических эллипсов уровня 95% по нормальному распределению находится большинство значений, однако для корректного описания наблюдаемых эмпирических распределений требуется использование других семейств распределений, в частности, характеризуемых "тяжелыми" хвостами и асимметрией.

В качестве направления дальнейших исследований внутри- и межгодовой изменчивости изучаемых в данной статье потоков можно отметить, что возможно дальнейшее развитие модели динамики потоков, основанной на методах стохастических дифференциальных уравнений Ланжевена [25] с расширенным статистическим анализом пространственно-временных взаимосвязей с использованием аппарата скользящего разделения смесей [30–32], с оценкой коэффициентов этих уравнений вариационными и статистическими методами, а также их сравнение с реальной динамикой потоков, изучаемой в настоящей работе.

Благодарности. Исследования К.П. Беляева выполнены в рамках госзадания ИО РАН им. П.П. Ширшова (тема № FMWE-2021-0002), а также при частичной поддержке гранта РНФ № 20-17-00139. Статистический анализ пространственно-временных данных реанализа выполнен с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования "Высокопроизводительные вычисления и большие данные" (ЦКП "Информатика") ФИЦ ИУ РАН (г. Москва).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Gulev S.K., Jung T., Ruprecht E.* Estimation of the impact of sampling errors in the VOS observations on airsea fluxes. Part I. Uncertainties in climate means // Journal of Climate. 2007. V. 20. № 2. P. 279–301.
- Loeb N.G., Wielicki B.A., Doelling D.R. Toward Optimal Closure of the Earth's Top-of-Atmosphere Radiation Budget// Journal of Climate. 2009. V. 22. № 3. P. 748–766.
- https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5.
- Josey S., Kent E.C., Taylor P.K. New insights into the ocean heat budget closure problem from analysis of the SOC air-sea flux climatology // Journal of Climate. 1999. V. 12. P. 2856–2880.
- Grist J.R., Josey S.A. Inverse Analysis Adjustment of the SOC Air–Sea Flux Climatology Using Ocean Heat Transport Constraints // Journal of Climate. 2003. V. 16. P. 3274–3295.
- Berry D.I., Kent E.C. A new air-sea interaction gridded dataset from ICOADS with uncertainty estimates // Bulletin of the American Meteorological Society. 2009. V. 90. № 5. P. 645–656.
- 7. Yu L., Weller R.A. Objectively analyzed air-sea heat fluxes for the global ice-free oceans (1981-2005) //

Bulletin of the American Meteorological Society. 2007. V. 88. P. 527–539.

- Grodsky S., Bentamy A.A., Carton J.A., Pinker R.T. Intraseasonal latent heat flux based on satellite observations // Journal of Climate. 2009. V. 22. № 17. P. 4539– 4556.
- Andersson A., Klepp C., Fennig K., Bakan S., Grasl H., Schulz J. Evaluation of HOAPS-3 ocean surface freshwater flux components // Journal of Applied Meteorology and Climatology. 2011. V. 50. № 2. P. 379–398.
- Cayan D.R. Latent and sensible heat flux anomalies over the northern Oceans: The connection to monthly atmospheric circulation // Journal of Climate. 1992. V. 5. № 4. P. 354–369.
- 11. *Cayan D.R.* Variability of latent and sensible heat fluxes estimated using bulk formulate // Atmosphere-Ocean. 1992. V. 30. № 1. P. 1–42.
- Cayan D.R. Latent and sensible heat flux anomalies over the northern Oceans: Driving the sea surface temperature // Journal of Physical Oceanography. 1992. V. 22. № 8. P. 859–881.
- Gulev S.K., Latif M., Keenlyside N., Park W., Koltermann, K.P. North Atlantic ocean control on surface heat flux on multidecadal timescales // Nature. 2013. V. 499. № 7459. P. 464–467.
- von Schuckmann K., Palmer M.D., Trenberth K.E., Cazenave A., Chambers D., Champollion N., Hansen J., Josey S.A., Loeb N., Mathieu P.-P., Meyssignac B., Wild M. An imperative to monitor Earth's energy imbalance // Nature Climate Change. 2016. V. 6. P. 138–144.
- 15. *Liang X., Yu L.* Variations of the Global Net Air–Sea Heat Flux during the "Hiatus" Period (2001–10) // Journal of Climate. 2016. V. 29. № 10. P. 3647–3660.
- Robertson F.R., Roberts J.B., Bosilovich M.G., Bentamy A., Clayson C.A., Fennig K., Schröder M., Tomita H., Compo G.P., Gutenstein M., Hersbach H., Kobayashi C., Ricciardulli L., Sardeshmukh P., Slivinski L.C. Uncertainties in Ocean Latent Heat Flux Variations over Recent Decades in Satellite-Based Estimates and Reduced Observation Reanalyses // Journal of Climate. 2020. V. 33. № 19. P. 8415–8437.
- 17. 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. V. 44. № 7. P. 3246–3254.
- Bishop S.P., Small R.J., Bryan F.O., Tomas R.A. Scale Dependence of Midlatitude Air–Sea Interaction // Journal of Climate. 2017. V. 30. № 20. P. 8207–8221.
- Tilinina N., Gavrikov A., Gulev S. Association of the North Atlantic surface turbulent heat fluxes with midlatitude cyclones // Monthly Weather Reviews. 2018. V. 146. № 11. P. 3691–3715.
- Bentamy A., Piollé J.F., Grouazel A., Danielson R., Gulev S. et al. Review and assessment of latent and sensible heat flux accuracy over the global oceans // Re-

mote Sensing of Environment. 2017. V. 201. P. 196–218.

- Gulev S.K., Belyaev K.P. Probability distribution characteristics for surface air-sea turbulent heat fluxes over the global ocean // Journal of Climate. 2012. V. 25. P. 184–206.
- 22. Kumar M., Kumar A., Mahanti N.C., Mallik C., Shukla R.K. Surface flux modelling using ARIMA technique in humid subtropical monsoon area // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2009. V. 71. № 12. P. 1293–1298.
- 23. *Yu L., Weller R.A., Sun B.* Improving latent and sensible heat flux estimates for the Atlnatic Ocean (1988-99) by a synthesis approach // Journal of Climate. 2004. V. 17. P. 373–393.
- Kirtman B.P., Stockdale T., Burgman R. The ocean's role in modeling and predicting seasonal-to-interannual climate variations // International Geophysics. 2013. V. 103. P. 625–643.
- 25. 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 // Известия Российской Академии Наук. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 6. С. 707-720.
- 26. *Song X., Ning Ch., Duan Y.* Observed Extreme Air–Sea Heat Flux Variations during Three Tropical Cyclones in the Tropical Southeastern Indian Ocean // Journal of Climate, 2021. V. 34. № 9. P. 3683–3705.
- 27. Полонский А.Б., Воскресенская Е.Н. О статистической структуре гидрометеорологических полей в Северной Атлантике // Морской гидрофизический журнал. 2004. № 1. С. 14–25.
- Shapiro S.S., Wilk M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples // Biometrika. 1965. V. 52 (3–4). P. 591–611.
- 29. Володин И.Н. Лекции по теории вероятностей и математической статистике. Казань: Изд. Казанского Университета, 2006. 270с.
- 30. Королев В.Ю., Горшенин А.К., Гулев С.К., Беляев К.П. Статистическое моделирование турбулентных потоков тепла между океаном и атмосферой с помощью метода скользящего разделения конечных нормальных смесей // Информатика и ее применения. 2015. Т. 9. № 4. С. 3–13.
- Korolev V.Yu., Gorshenin A.K., Gulev S.K., Belyaev K.P. Statistical modeling of air-sea turbulent heat fluxes by finite mixtures of Gaussian distributions // Communications in Computer and Information Science. 2015. V. 564. P. 152–162.
- 32. 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. № 3. С. 3–12.

## Statistical Analysis of Intra- and Interannual Variability of Extreme Values of Sensible and Latent Heat Fluxes in the North Atlantic for 1979–2021

K. P. Belyaev<sup>1, 2, 3</sup>, A. K. Gorshenin<sup>2, \*</sup>, V. Yu. Korolev<sup>2, 3, 4</sup>, and A. D. Plekhanov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, 36 Nahimovskiy pr., Moscow, 117997 Russia <sup>2</sup>Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov. Str., Moscow, 119333 Russia

<sup>3</sup>Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991 Russia

<sup>4</sup>Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics, GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991 Russia \*e-mail: agorshenin@frccsc.ru

The paper analyzes the statistical patterns of intra- and interannual variability of sensible and latent heat fluxes in the North Atlantic, including evaluation of regression dependencies, with various averaging of time series. Different characteristics of flows are estimated, such as maxima and minima in the water area, means, medians. Based on the results of the ERA5 reanalysis data for 1979–2021, the evolution of these quantities in the North Atlantic is studied and compared with the behavior of the heat fluxes themselves both from year to year and within an averaged climatic year. It is demonstrated that there is a positive trend in flows. Its parameters are also estimated. The spatio-temporal variability of the extreme characteristics of the flows, the maximum and minimum, over the domain at a fixed point in time, is analyzed.

Keywords: heat fluxes, ocean-atmosphere, statistical models, North Atlantic