

УСЛОВИЯ ОБИТАНИЯ ПРОМЫСЛОВЫХ ОБЪЕКТОВ
ENVIRONMENTS OF FISHERIES RESOURCES

Научная статья

УДК 551.465.7

DOI: 10.26428/1606-9919-2025-205-728-736

EDN: MDSIMQ



**ПОТОК ЭНТРОПИИ ЧЕРЕЗ ПОВЕРХНОСТЬ РАЗДЕЛА
МЕЖДУ ОКЕАНОМ И АТМОСФЕРОЙ КАК ИНТЕГРАЛЬНЫЙ
ИНДИКАТОР КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ОКЕАНА**

Т.Р. Кильматов^{1,2}, Н.И. Рудых^{1*}

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43;

² Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского,
690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а

Аннотация. Представлен расчет климатического тренда потока энтропии через поверхность вода–воздух для меридионального разреза 180° в Тихом океане. Расчеты проведены по среднегодовым данным тепловых характеристик поверхности воды и компонентам теплового баланса с пространственным шагом 4° за 1979–2024 гг. Порядок отрицательного потока энтропии $\sim 3 \cdot 10^{-2}$ W/m²K, и эта величина имеет временную тенденцию приближения к нулю. Сделана оценка средней скорости диссипации механической (турбулентной) энергии на единицу массы $\sim 2 \cdot 10^{-7}$ m²/c³. Обсуждается разность трендов тепловых характеристик вследствие «открытости» и «закрытости» полярных акваторий Тихого океана в южном и северном полушариях. Отмечается возможность обратной связи параметров в направлении климатической устойчивости. Приближение потока энтропии к нулю уменьшает динамические процессы. Деградация движений увеличивает меридиональную разность температур между нагревателем (тропики) и холодильником (полюсы). Это приводит к обратному процессу — увеличению потока энтропии и возвращению океана к предыдущему стационарному состоянию.

Ключевые слова: Тихий океан, поверхность океан–атмосфера, баланс потока тепла, климатический тренд, поток энтропии

Для цитирования: Кильматов Т.Р., Рудых Н.И. Поток энтропии через поверхность раздела между океаном и атмосферой как интегральный индикатор климатических изменений океана // Изв. ТИНРО. — 2025. — Т. 205, вып. 4. — С. 728–736. DOI: 10.26428/1606-9919-2025-205-728-736. EDN: MDSIMQ.

* Кильматов Талгат Рустемович, доктор физико-математических наук, профессор, talgat_k@mail.ru, ORCID 0000-0002-0574-1452; Рудых Наталья Ивановна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, rudykh@poi.dvo.ru, ORCID 0000-0001-6714-7662.

© Кильматов Т.Р., Рудых Н.И., 2025

Original article

Entropy flux through the ocean–atmosphere boundary as an integral indicator of the ocean climate change

Talgat R. Kilmatov*, Natalia I. Rudykh**

* Pacific Oceanological Institute, Russian Ac. Sci., 43, Baltiyskaya Str., Vladivostok, 690041; Maritime State University, 50, Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003, Russia

** Pacific Oceanological Institute, Russian Ac. Sci., 43, Baltiyskaya Str., Vladivostok, 690041, Russia

* D.Phys.-Math., professor, talgat_k@mail.ru, ORCID 0000-0002-0574-1452

** Ph.D., senior researcher, rudykh@poi.dvo.ru, ORCID 0000-0001-6714-7662

Abstract. Climatic trend of the entropy flux across the water-air boundary is determined for the oceanographic section along 180° meridian in the Pacific Ocean. The flux is calculated on the average annual data for SST and components of heat balance with 4-degree spatial resolution for 1979–2024. The flux is negative with the value $\sim 3 \cdot 10^{-2}$ W/m²K and has a tendency toward zero. Mean rate of the turbulent energy dissipation per unit mass is evaluated as $\sim 2 \cdot 10^{-7}$ m²/s³. Different trends in thermal conditions for the “closed” and “open” polar areas in the Southern and Northern Hemispheres, respectively, are discussed. Possible feedback of the parameters toward climate stability is noted: the lower the entropy flux, the weaker water dynamics, and the higher SST difference between tropical and polar zones, that leads to reverse process of increasing the entropy flux and returns the ocean back to its previous stationary state.

Keywords: Pacific Ocean, ocean-atmosphere boundary, heat flux balance, climatic trend, entropy

For citation: Kilmatov T.R., Rudykh N.I. Entropy flux through the ocean–atmosphere boundary as an integral indicator of the ocean climate change, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2025, vol. 205, no. 4, pp. 728–736. (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2025-205-728-736. EDN: MDSIMQ.

Введение

Сложность адекватного описания термодинамических процессов, происходящих в климатической системе, на сегодняшний день не преодолена. Это связано с тем, что множество взаимосвязанных параметров разной природы влияют на систему и их роль в клубке этих взаимодействий точно не параметризована. Поэтому в данной ситуации используются разные подходы, в том числе подходы термодинамики.

Методы классической термодинамики [Седов 1973; Ландау, Лифшиц, 2002], неравновесной термодинамики [Гленсдорф, Пригожин, 1973] широко применяются для описания климатической системы Земли и ее компонентов [Lucarini et al., 2011, 2014; Kleidon et al., 2019; Ghill, Lucarini, 2020]. Выделим работу В.В. Шулейкина [1968], где ясно изложен подход к климатической системе как термодинамической машине с нагревателями и холодильниками разных частей планеты. Много публикаций посвящено исследованию стационарных состояний климата планеты в целом [напр., Ghill, Lucarini, 2020], поскольку такая система замкнута и лучше соответствует теоретическим постулатам неравновесной термодинамики. Есть также серия статей [Голицин, Мохов, 1978; Paltridge, 2001; Pascale et al., 2011, 2012; Lucarini et al., 2014; Yang et al., 2025] по исследованию экстремальных свойств производства энтропии для выделения климатических стационарных устойчивых состояний с помощью теоретических построений и численных экспериментов. Отметим работы приложения неравновесной термодинамики к океану как отдельному компоненту климатической системы [Кильматов, 1984, 1987; Bannon, Najjar, 2018], хотя рассмотрение океана как замкнутой термодинамической системы возможно только в определенном приближении. Океан через границы, кроме тепловых потоков на поверхности, обменивается массой (осадки–испарение), плюс геотермальные потоки на дне. Дополнительно генерируется поток тепла вследствие диссипации работы ветра, приливной энергии. Подчеркнем, что эффект теплообмена на поверхности океан–атмосфера является доминирующим

в процессе генерации потока энтропии [Кильматов, 1984, 1987; Bannon, Najjar, 2018], поэтому ниже ограничиваемся только учетом этого фактора.

В стационарном состоянии интегральное производство энтропии компенсируется суммарным потоком энтропии через границу [Глендорф, Пригожин, 1973]. Важно, что интегральный поток энтропии можно оценить через граничные параметры без учета внутренней структуры изучаемого объекта. Поток энтропии является мерой отклонения системы от равновесного состояния. Количественная интерпретация суммарного потока энтропии показывает, какая часть тепловой энергии (нормированная на температуру) вследствие неравномерности нагрева–охлаждения акватории может переходить в механическую работу. Чем значительнее поток энтропии, тем интенсивнее динамические процессы в океане. Это имеет прямую связь с изменением кинетической энергии вод океана.

Цель настоящей работы — на основе базы данных* провести количественную оценку декадной изменчивости интегрального потока энтропии для выделенной акватории Тихого океана. Изменчивость рассчитываемого параметра за последние десятилетия характеризует тенденцию изменения динамических процессов в океане вследствие наблюдаемых климатических трендов. Здесь надо отметить, что используемые компоненты потоков тепла на верхней границе океана, в свою очередь, являются рассчитываемыми по полуэмпирическим формулам величинами [Краус, 1976], поэтому в представленных результатах главным являются не абсолютные значения потоков энтропии, а тенденции климатических трендов.

Модельные упрощения и блоковая имитация

В работе используются следующие упрощения. Рассматривается только тепловое взаимодействие через поверхность океан–атмосфера как суммарный поток тепла Q (сумма потоков радиационного баланса, скрытого и явного тепла). Термодинамика океана описывается среднегодовыми характеристиками и близка к стационарному состоянию. В качестве примера представлена простая двухблочная модель, имитирующая тропические широты — нагреватель и субполярные — холодильник (рис. 1).

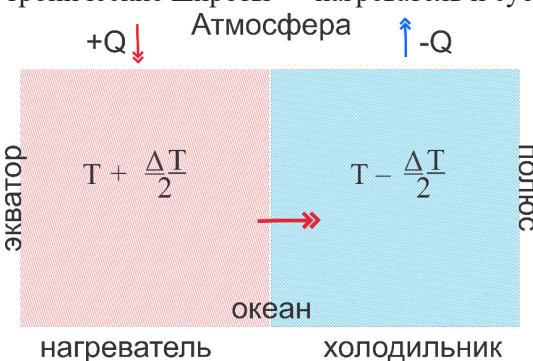


Рис. 1. Простая замкнутая стационарная двухблочная модель теплового взаимодействия океана и атмосферы. Суммарный поток тепла Q , средняя температура поверхности T , перепад температур между блоками ΔT

Fig. 1. Simple stationary two-block model of thermal interaction between the ocean and atmosphere. Q — heat flux; T — average sea surface temperature; ΔT — temperature difference between blocks

В данном приближении внутри непрерывное производство энтропии (выравнивание градиента температуры между блоками) компенсируется отрицательным потоком энтропии E . Этот поток энтропии рассчитывается по формуле

$$E = \frac{Q}{T + \frac{\Delta T}{2}} + \frac{-Q}{T - \frac{\Delta T}{2}} \approx -Q \frac{\Delta T}{T^2} \approx -2,5 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м}^2\text{К}. \quad (1)$$

В правой части (1) параметры и их характерные значения в океане: суммарный тепловой баланс на поверхности океана $Q \sim 100 \text{ Вт/м}^2$; средняя температура воды на поверхности $T \sim 280 \text{ К}$; перепад температуры между «нагревателем» и «холодильником» $\Delta T \sim 20 \text{ К}$. Формально в данном приближении по глубине рассматривается только верхний деятельный слой океана [Краус, 1976].

* Schlitzer R. Ocean Data View. Software. 2025. <https://odv.awi.de>.

Структура формулы потока энтропии показывает, что нагрев поверхности океана, увеличение средней температуры воды, уменьшение перепада температур, уменьшение суммарного потока тепла приближают поток энтропии к нулю, т.е. приводят к тенденции ослабевания динамических потоков в океане. В частности в сценарии, когда при прочих равных условиях фиксируется климатическая тенденция нагрева воды на δT , поток энтропии уменьшается:

$$E_{\delta T} = \frac{Q}{T + \delta T + \frac{\Delta T}{2}} + \frac{-Q}{T + \delta T - \frac{\Delta T}{2}} \approx -Q \frac{\Delta T}{(T + \delta T)^2} \approx E(1 - 2 \frac{\delta T}{T}), \quad (2)$$

система ближе к состоянию равновесия, динамические процессы в океане ослабевают. Аналогичный процесс происходит при уменьшении поступающего теплового потока в океан на величину δQ , поток энтропии уменьшается, $E_{\delta Q} \approx E(1 - \frac{\delta Q}{T})$. Оба сценария приводят к более «вязкой» динамике, уменьшению кинетической энергии, как следствие, к ослаблению устойчивости струйных потоков, меандров, синоптических вихрей.

Расчет изменчивости потока энтропии в акватории Тихого океана за последние 45 лет

Применим рассмотренный выше подход для расчета суммарного потока энтропии для акватории Тихого океана по разрезу, ориентированному вдоль 180-го меридиана. Акватория выбрана таким образом, чтобы было максимальное удаление от материков, длина меридионального разреза охватывала высокие и низкие широты в северном и южном полушариях. Размеры блоков вдоль разреза 4° , количество блоков в северном полушарии 17, в южном — 20. Осреднение и шаг по времени один год, период времени 45 лет (1979–2024 гг.). Ясно, что для каждого выделенного года суммарное число значений по температуре поверхности воды и баланса теплового потока равно числу блоков, т.е. 37.

Расчеты трендов проводились в трех вариантах — для северного и для южного полушарий, а также для всего разреза в целом. Результаты представлены изменением параметров во времени. Цель расчетов — проследить климатические тренды рассчитываемых характеристик.

Исходные данные для суммарного потока тепла с 1979 по 2024 г. получены с NCEP/DOE Reanalysis II (<https://www.psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html>) [Kanamitsu et al., 2011]. Также для расчетов использовалась температура поверхности океана (sst) с NOAA Extended Reconstructed SST V5 (<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.ersst.v5.html>) [Huang et al., 2017].

Краткая статистика для значений Q : диапазон изменений по разрезу за 1979–2024 гг. от -202 до $+157 \text{ W/m}^2$, стандартное отклонение $\sim 59,14 \text{ W/m}^2$. Для температуры воды T : диапазон изменений 271 – 304 K , среднее значение $\sim 290 \text{ K}$, стандартное отклонение $\sim 10,7 \text{ K}$. Отметим, что суммарный баланс потока тепла по выделенным акваториям не равен нулю, среднее значение годового баланса $\sim 7,5486 \text{ W/m}^2$ (что составляет $2,1 \%$ от диапазона изменений потока), характерное среднее значение положительного потока теплового баланса $Q^+ \sim 50 \text{ W/m}^2$.

Временная изменчивость и климатические тренды рассматриваемых характеристик

Ниже представлены количественные оценки изменчивости рассматриваемых параметров — температуры, потока тепла, потока энтропии — в последние десятилетия на выделенном разрезе. Результаты приведены в графическом виде. На рис. 2 (а) показано, что поверхностная температура воды в рассматриваемой акватории увеличивается, это порядка $0,15 \text{ K/10 лет}$. Здесь $\bar{T} = \frac{1}{n} \sum T_i$ — средняя температура. Знак Σ^* в работе означает суммирование характеристики (*) по выделенному разрезу для каждого года в отдельности.

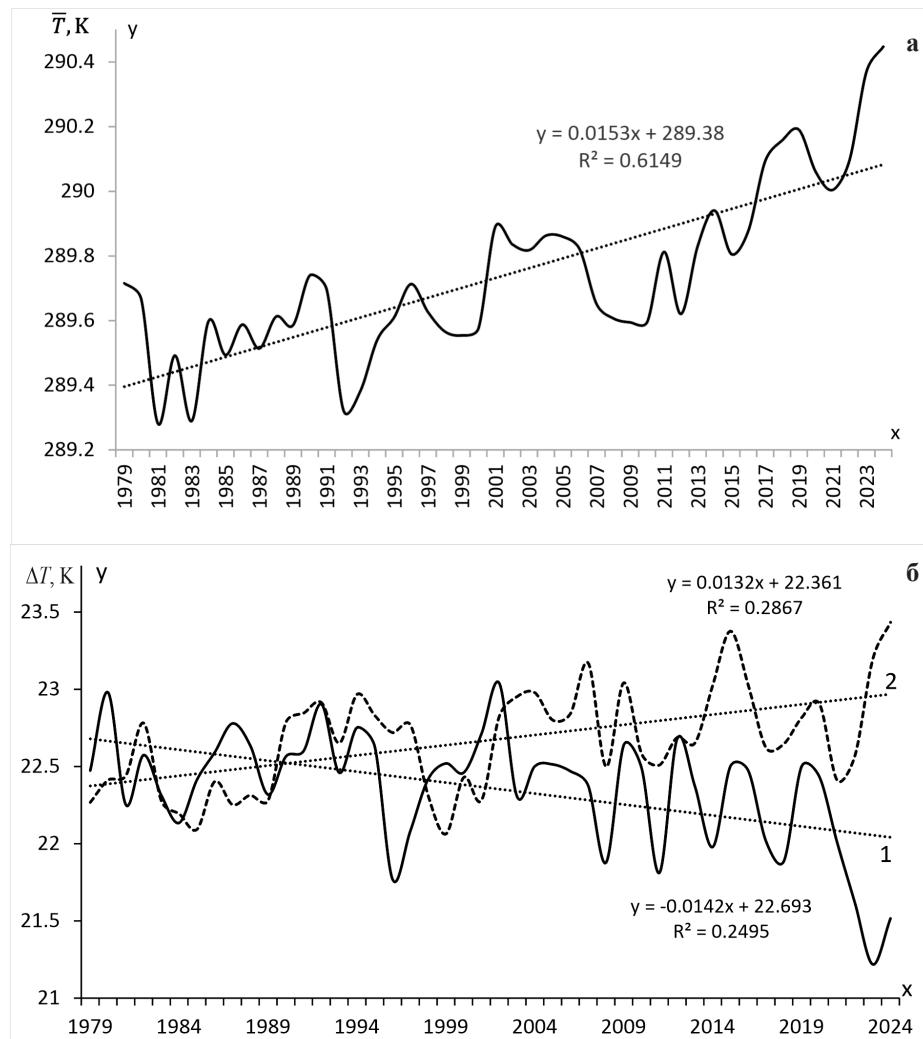


Рис. 2. Временное изменение средней температуры поверхности на разрезе по 180° (а) и изменение перепада поверхностных температур между экватором и высокими широтами (б): 1 — северное полушарие, 2 — южное

Fig. 2. Dynamics of average SST at the section along 180° (а) and the SST difference between the equator and polar areas along the section (б): 1 — Northern Hemisphere, 2 — Southern Hemisphere

На рис. 2 (б) отметим разнонаправленный тренд перепада поверхностных температур. Это разность средней поверхностной температуры тропических широт ($\pm 20^{\circ}$ широты) и субполярных поверхностных вод (выше 40° широты) соответственно в северном и южном полушариях. Северное полушарие изолировано от полярных вод, наблюдаемая тенденция на выравнивание перепада температур направлена на уменьшение потока энтропии (при прочих равных условиях). Следствием этого является климатическая направленность на деградацию динамических процессов в этом регионе. Южный Тихий океан открыт к полярным водам, меридиональный перепад температур увеличивается на разрезе. Хотя общий нагрев воды направлен в сторону уменьшения потока энтропии, перепад температур частично компенсирует уменьшение. Это разнонаправленный процесс с точки зрения влияния на изменения потока энтропии только в южном полушарии.

Временные тренды суммарного теплового баланса $\bar{Q} = \sum Q_i$ (рис. 3) для северного и южного полушарий имеют разные линейные скорости изменения. Характерный порядок разнонаправленного изменения $\sim 1 \text{W/декада}$.

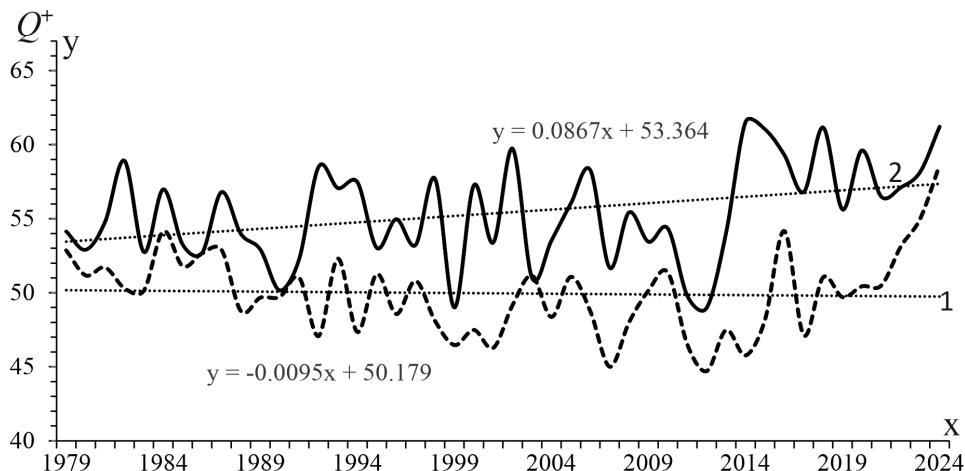


Рис. 3. Климатический тренд поступающего теплового потока Q^+ для северного (1) и южного (2) полушарий на меридиональном разрезе 180°

Fig. 3. Climatic trend of the incoming heat flux Q^+ for the parts of section along 180° in the Northern (1) and Southern (2) Hemispheres

Представленная на рис. 4 временная изменчивость потока энтропии за последние десятилетия демонстрирует, что производство кинетической (механической) энергии уменьшается, поскольку наблюдается тенденция приближения потока энтропии к нулю со скоростью примерно 1 % за десятилетие. Это следует из того, что в соответствии с термодинамикой скорость диссипации механической (турбулентной) энергии на единицу массы в океане A можно оценить

по формуле $A = \frac{ET}{\rho H} \approx 2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}^3$, где $\rho \sim 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$ — масштаб плотности морской воды, $H \sim 4 \cdot 10^3 \text{ м}$ — характерная глубина океана. В целом отметим, что имеется тенденция климатического уменьшения динамической активности в последние десятилетия, связанная с возможностью преобразования тепловой энергии.

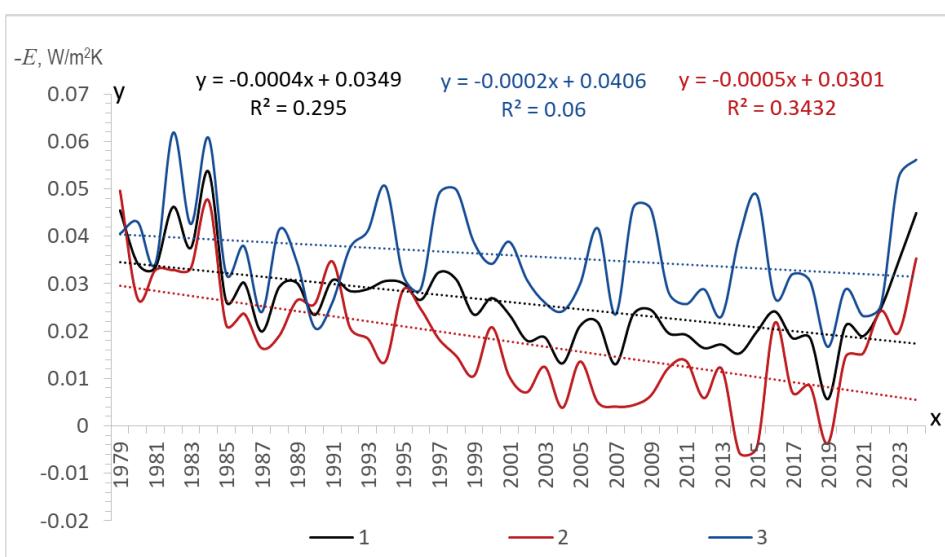


Рис. 4. Временная изменчивость среднегодового отрицательного потока энтропии ($-E$) по всему разрезу (1), в южном (2) и северном (3) полушариях

Fig. 4. Temporal variability of the annual mean entropy flow $-E$ (modular values) for the entire section along 180° (1) and for its parts in the Southern (2) and Northern (3) Hemispheres

Заключение

Представленный подход оценки климатических изменений с использованием оценки трендов потока энтропии через поверхность океана имеет положительные и отрицательные особенности. Положительные — возможность интегральной оценки скорости преобразования тепловой энергии в кинетическую; использование для расчетов только данных наблюдений на поверхности океана; в качестве теоретической основы можно применять только первые два закона термодинамики; не нужно привлекать дополнительные гипотезы и модели для описания внутренних процессов в океане. Отрицательные — результаты и интерпретация возможны только в интегральном виде; невозможность детализации процессов; компоненты теплового баланса на поверхности рассчитываются по полуэмпирическим формулам; значения этих потоков в наблюдаемом масштабе являются оценочными, как следствие — главное внимание надо уделять временным трендам рассчитываемых величин, а не абсолютным значениям.

Представленный расчет для разреза 180° для северной и южной частей Тихого океана показывает, что имеется разность в климатических трендах, которые связаны, скорее всего, с «закрытостью» северной части материками от «холодильника» — полярной зоны.

Рассматривая климатический тренд потока энтропии, можно отметить возможность потенциальной способности океана к устойчивости климата вследствие эффекта отрицательной обратной связи. Приближение потока энтропии к нулю уменьшает динамические процессы, их затухание увеличивает разность температур между нагревателем (тропики) и холодильником (полюсы), что, в свою очередь, приведет к обратному процессу — увеличению потока энтропии и возвращению океана к прежнему стационарному состоянию.

Благодарности (ACKNOWLEDGEMENTS)

Авторы выражают благодарность рецензентам за ценные замечания, полученные при подготовке работы.

The authors are thankful to anonymous reviewers for their valuable comments useful for the article.

Финансирование работы (FUNDING)

Работа была выполнена в рамках двух Государственных заданий ТОИ ДВО РАН: «Исследование климатических аспектов распространения природных газов в морских акваториях и на прибрежных территориях, а также связанных с этим явлений и процессов», регистрационный номер 125051406034-3; «Исследование структуры и динамики вод Мирового океана в условиях современных климатических изменений», регистрационный номер 124022100079-4.

The study was funded from the budget of Pacific Oceanological Institute, Far-Eastern branch of Russian Ac. Sci. in the frameworks of two state assignments, as «Study of climatic aspects of natural gas distribution in marine waters and coastal areas, as well as related phenomena and processes» (registration number 125051406034-3) and “Study of the structure and dynamics of the waters of the World Ocean under conditions of modern climate change” (registration number 124022100079-4).

Соблюдение этических стандартов (COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS)

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с использованием животных в качестве объектов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The article does not concern any study with using animals as subjects.

The authors declare no conflict of interest.

Информация о вкладе авторов (AUTHOR CONTRIBUTIONS)

Т.Р. Кильматов — физико-математическая постановка и построение модели, текст работы, интерпретация результатов; Н.И. Рудых — сбор, обработка, анализ данных, интерпретация результатов.

T.R. Kilmatov — physical and mathematical concept of the study and the model development, interpretation of the results, writing and illustrating the text; N.I. Rudykh — data collection, processing and analysis, interpretation of the results.

Список литературы

- Глендорф П., Пригожин И.** Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций : моногр. : пер. с англ. — М. : Мир, 1973. — 280 с.
- Голицин Г.С., Мохов И.И.** Об устойчивости и экстремальных свойствах моделей климата // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. — 1978. — Т. 14, № 4. — С. 378–387.
- Кильматов Т.Р.** Методы неравновесной термодинамики в физической океанологии : моногр. — Владивосток : ДВО АН СССР, 1987. — 79 с.
- Кильматов Т.Р.** Средний поток энтропии через поверхность Мирового океана // ДАН СССР. — 1984. — Т. 275, № 4. — С. 1015–1018.
- Краус Е.** Взаимодействие атмосферы и океана : моногр. : пер. с англ. — Л. : Гидрометеоиздат, 1976. — 295 с.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Теоретическая физика : учеб. пособ. : для вузов. В 10 т. Т. 5 : Статистическая физика. Ч. 1. — 5-е изд. — М. : Физматлит, 2002. — 616 с.
- Седов Л.И.** Механика сплошной среды. Т. 1 : моногр. — М. : Наука, 1973. — 536 с.
- Шулейкин В.В.** Физика моря : моногр. — М. : Наука, 1968. — 1090 с.
- Bannon P.R., Najjar R.G.** Heat-Engine and Entropy-Production Analyses of the World Ocean // J. Geophys. Res. Oceans. — 2018. — Vol. 123(8). — P. 8532–8547. DOI: 10.1029/2018JC014261.
- Ghil M., Lucarini V.** The Physics of Climate Variability and Climate Change // Reviews of Modern Physics. — 2020. — Vol. 92, № 3. — P. 1–77. DOI: 10.1103/RevModPhys.92.035002.
- Huang B., Thorne P.W., Banzon V.F. et al.** Extended Reconstructed Sea Surface Temperature, Version 5 (ERSSTv5): Upgrades, validations, and intercomparisons // J. Climate. — 2017. — Vol. 30, Iss. 20. — P. 8179–8205. DOI: 10.1175/jcli-d-16-0836.1.
- Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J. et al.** NCEP–DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) // Bulletin of the American Meteorological Society. — 2011. — Vol. 83, № 11. — P. 1631–1644. DOI: 10.1175/BAMS-83-11-1631.
- Kleidon A., Zehe E., Loritz R.** ESD Ideas: Structures dominate the functioning of Earth systems, but their dynamics are not well represented // Earth Syst. Dynam. — 2019. — Discuss. [preprint]. DOI: 10.5194/esd-2019-52.
- Lucarini V., Fraedrich K., Ragone F.** New Results on the Thermodynamic Properties of the Climate System // J. Atmos. Sci. — 2011. — Vol. 68, № 10. — P. 2438–2458. DOI: 10.1175/2011JAS3713.1.
- Lucarini V., Pascale S.** Entropy production and coarse graining of the climate fields in a general circulation model // Climate Dynamics. — 2014. — Vol. 43. — P. 981–1000. DOI: 10.1007/s00382-014-2052-5.
- Paltridge G.W.** A physical basis for a maximum of thermodynamic dissipation of the climate system // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. — 2001. — Vol. 127(572). — P. 305–313. DOI: 10.1002/qj.49712757203.
- Pascale S., Gregory J.M., Ambaum M., Tailleux R.** A parametric sensitivity study of entropy production and kinetic energy dissipation using the FAMOUS AOGCM // Climate Dynamics. — 2012. — Vol. 38(5). — P. 1211–1227. DOI: 10.1007/s00382-011-0996-2.
- Pascale S., Gregory J.M., Ambaum M., Tailleux R.** Climate entropy budget of the HadCM3 atmosphere–ocean general circulation model and of FAMOUS, its low-resolution version // Climate Dynamics. — 2011. — Vol. 36. — P. 1189–1206. DOI: 10.1007/s00382-009-0718-1.
- Yang Y., Sun H., Wang J. et al.** Global ocean surface heat fluxes derived from the maximum entropy production framework accounting for ocean heat storage and Bowen ratio adjustments // Earth System Science Data. — 2025. — Vol. 17, Iss. 3. — P. 1191–1216. DOI: 10.5194/essd-17-1191-2025.

Reference

- Glansdorff, P. and Prigogine, I.** *Thermodynamic theory of structure, stability and fluctuation*, Université Libre de Bruxelles, Brussels, Belgium, and University of Texas, Austin, Texas, 1971.

- Golitsyn, G.S. and Mokhov, I.I.**, On the stability and extremal properties of climatic models, *Izv. Akad. Nauk SSSR, Fizika atmosfery i okeana*, 1978, vol. 14, no. 4, pp. 378–387.
- Kilmatov, T.R.**, *Metody neravnovesnoy termodynamiki v okeanologii* (Methods of nonequilibrium thermodynamics in oceanology), Vladivostok: Dal'nevost. Otd. Akad. Nauk SSSR, 1987.
- Kilmatov, T.R.**, The average entropy flux through the surface of the World Ocean, *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1984, vol. 275, no. 4, pp. 1015–1018.
- Kraus, E.B.**, *Atmosphere-ocean interaction*, Oxford, Clarendon Press, 1972.
- Landau, L.D. and Lifshitz, E.M.**, *Teoreticheskaya fizika : ucheb. posob. : dlya vuzov. V 10 t. T. 5: Statisticheskaya fizika. Ch. 1* (Theoretical Physics: a textbook: for universities. In 10 volumes. Vol. 5: Statistical Physics. Part 1), 5th ed., Moscow: FIZMATLIT, 2002.
- Sedov, L.I.**, *Mekhanika sploshnoy sredy* (Continuum Mechanics), vol. 1, Moscow: Nauka, 1973.
- Shuleikin, V.V.**, *Fizika morya* (Physics of the Sea), Moscow: Nauka, 1968.
- Bannon, P.R. and Najjar, R.G.**, Heat-Engine and Entropy-Production Analyses of the World Ocean, *J. Geophys. Res. Oceans*, 2018, vol. 123, no. 8, pp. 8532–8547. doi 10.1029/2018JC014261
- Ghill, M. and Lucarini, V.**, The Physics of Climate Variability and Climate Change, *Reviews of Modern Physics*, 2020, vol. 92, no. 3, pp. 1–77. doi 10.1103/RevModPhys.92.035002
- Huang, B., Thorne, P.W., Banzon, V.F., Boyer, T., Chepurin, G., Lawrimore, Jay, H., Menne, M.J., Smith, T.M., Vose, R.S., and Huai-Min Zhang**, Extended Reconstructed Sea Surface Temperature, Version 5 (ERSSTv5): Upgrades, validations, and intercomparisons, *J. Climate*, 2017, vol. 30, no. 20, pp. 8179–8205. doi 10.1175/JCLI-D-16-0836.1
- Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, S-K., Hnilo, J.J., Fiorino, M., and Potter, G.L.**, NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2), *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2011, vol. 83, no. 11, pp. 1631–1644. doi 10.1175/BAMS-83-11-1631
- Kleidon, A., Zehe, E., and Loritz, R.**, ESD Ideas: Structures dominate the functioning of Earth systems, but their dynamics are not well represented, *Earth Syst. Dynam.*, 2019, Discuss., [preprint]. doi 10.5194/esd-2019-52
- Lucarini, V., Fraedrich, K., and Ragone, F.**, New Results on the Thermodynamic Properties of the Climate System, *J. Atmos. Sci.*, 2011, vol. 68, no. 10, pp. 2438–2458. doi 10.1175/2011JAS3713.1
- Lucarini, V. and Pascale, S.**, Entropy production and coarse graining of the climate fields in a general circulation model, *Climate Dynamics*, 2014, vol. 43, pp. 981–1000. doi 10.1007/s00382-014-2052-5
- Paltridge, G.W.**, A Physical Basis for a Maximum of Thermodynamic Dissipation of the Climate System, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2001, vol. 127, no. 572, pp. 305–313. doi 10.1002/qj.49712757203
- Pascale, S., Gregory, J.M., Ambaum, M., and Tailleux, R.**, A parametric sensitivity study of entropy production and kinetic energy dissipation using the FAMOUS AOGCM, *Climate Dynamics*, 2012, vol. 38, no. 5, pp. 1211–1227. doi 10.1007/s00382-011-0996-2
- Pascale, S., Gregory, J.M., Ambaum, M., and Tailleux, R.**, Climate entropy budget of the HadCM3 atmosphere–ocean general circulation model and of FAMOUS, its low-resolution version, *Climate Dynamics*, 2011, vol. 36, pp. 1189–1206. doi 10.1007/s00382-009-0718-1
- Yang, Y., Sun, H., Wang, J., Zhang, W., Zhao, G., Wang, W., Cheng, L., Chen, L., Qin, H., and Cai, Zh.**, Global ocean surface heat fluxes derived from the maximum entropy production framework accounting for ocean heat storage and Bowen ratio adjustments, *Earth System Science Data*, 2025, vol. 17, no. 3, pp. 1191–1216. doi 10.5194/essd-17-1191-2025
- Schlitzer, R.**, *Ocean Data View*, <https://odv.awi.de>, 2025.
- <https://www.psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html>. Cited July, 24, 2025.
- <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.ersst.v5.html>. Cited July, 24, 2025.

Поступила в редакцию 12.08.2025 г.

После доработки 5.11.2025 г.

Принята к публикации 3.12.2025 г.

The article was submitted 12.08.2025; approved after reviewing 5.11.2025; accepted for publication 3.12.2025