

Научная статья

УДК 551.583.2

DOI: 10.26428/1606-9919-2026-206-376-384

EDN: UAIOLG



ГАЛИННЫЙ ПОТОК ЭНТРОПИИ В ОКЕАН ВСЛЕДСТВИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗНОСТИ ОСАДКОВ И ИСПАРЕНИЯ

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. Построены полуэмпирические формулы для оценки галинной компоненты потока энтропии, генерированной неравномерностью пространственного распределения разности испарения и осадков и поля солёности на границе океан–атмосфера. Представлены расчеты декадного (10 лет) изменения потока энтропии на меридиональном разрезе 180° в Тихом океане за период 40 лет. Использовались исходные данные с пространственным шагом 4° из Базы данных GODAS (Global Ocean Data Assimilation System). Рассматриваемый временной период — 1984–2024 гг. Акватория сепарируется на блоки с преобладанием испарения (рост солёности воды в поверхностном слое) и преобладаем осадков (распреснение). Приводятся декадные изменения характеристик — потоков массы, температуры, солёности для блоков. Оценка галинной компоненты потока энтропии имеет порядок $-5 \cdot 10^{-5}$ Вт/м²К. Это составляет не более 1 % от потока энтропии, генерированного потоками тепла между океаном и атмосферой. В то же время отмечается важность этой характеристики для контроля устойчивости параметров водообмена на фоне наблюдаемых климатических трендов. Расчет показывает рост разности средних поверхностных температур морской воды между акваториями с преобладанием испарения и доминированием осадков. Суммарный (за счет тепло- и массообменов) поток энтропии растёт и это благоприятная тенденция в направлении поддержания горизонтальных градиентов термогалинных параметров в климатическом масштабе.

Ключевые слова: поток энтропии, испарение и осадки, солёность, поток массы, химический потенциал, климатический тренд

Для цитирования: Кильматов Т.Р., Рудых Н.И. Галинный поток энтропии в океан вследствие пространственной неравномерности распределения разности осадков и испарения // Изв. ТИНРО. — 2026. — Т. 206, вып. 2. — С. 376–384. DOI: 10.26428/1606-9919-2026-206-376-384. EDN: UAIOLG.

* 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., 2026

Haline entropy flux into the Ocean due to spatial heterogeneity of the difference precipitation — evaporation

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

* Pacific Oceanological Institute, Russian Ac. Sci., 43, Baltiyskaya Str., Vladivostok, 690041, Russia; 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. The formulas are proposed for estimating the haline component of entropy flux generated by uneven spatial distribution of evaporation, precipitation, and salinity at the ocean–atmosphere boundary. The entropy flux is calculated with 4° discretion on GODAS (Global Ocean Data Assimilation System) data for the meridian transect in the Pacific along 180° in 1984–2024 and its decadal variability is analyzed. The transect is separated to blocks with prevalence of evaporation (the salt flux into the ocean) and precipitation (the salt flux from the ocean). The fluxes of temperature, salinity, and mass are determined for each block and the haline component of entropy flux is estimated as $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ W/m²K. This value does not exceed 1 % of the entropy flux caused by heat exchange between the ocean and atmosphere. However, this parameter is important for monitoring of the water exchange stability in conditions of changing climate. Increasing difference of the sea surface temperature is observed between blocks with opposite balance of evaporation and precipitation, but the tendency for the total entropy flux (due to heat and mass transfer) to increase presumably stabilizes spatial gradients of temperature and salinity on climate scale.

Keywords: entropy flux, evaporation-precipitation balance, salinity, mass flux, chemical potential, climate trend

For citation: Kilmатов T.R., Rudykh N.I. Haline entropy flux into the Ocean due to spatial heterogeneity of the difference precipitation — evaporation, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2026, vol. 206, no. 2, pp. 376–384. (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2026-206-376-384. EDN: UAIOLG.

Введение

Пространственное распределение поверхностного поля солёности в океане в большой степени формируется за счёт разности осадков и испарения, т.е. массообмена пресной воды через границу вода–воздух. Этот процесс не только определяет глобальный гидрологический цикл и климатические изменения, но и поддерживает пространственные градиенты полей солёности, компенсируя выравнивание поля солёности вследствие адвекции и турбулентного перемешивания. Рассмотрим этот процесс с точки зрения производства энтропии вследствие обмена массой. Такой подход, основанный на неравновесной термодинамике, позволяет использовать энтропийный анализ для контроля климатических вариаций термогалинных полей в толще Мирового океана.

В соответствии с классической и неравновесной термодинамикой [Гленсдорф, Пригожин, 1973; Седов, 1973; Дьярмати, 1974; Ландау, Лифшиц, 2002] поток энтропии можно сепарировать на две компоненты — за счёт обмена теплом и обмена массой. Последнюю компоненту будем называть галинным потоком энтропии, или просто галинным потоком. Стоит отметить, что теплообмен в генерации суммарного потока энтропии в климатической системе играет главную роль и тепловая компонента намного больше галинной, вклад которой по оценкам Т.Р. Кильматова [1984] не более 2 %. В то же время гидрологический цикл планеты и его изменчивость, поле солёности играют исключительную роль в биологической, социальной, экономической жизни цивилизации. В работе рассматривается только галинная компонента потока энтропии.

Подход энергетического анализа на основе второго закона термодинамики для климатической системы планеты имеет широкое применение [Lucarini et al., 2011;

Lucarini, Pascale, 2014; Pascale et al., 2011, 2012; Bannon, Najjar, 2018; Ghill, Lucarini, 2020], поскольку такая система замкнута и лучше соответствует теоретическим постулатам неравновесной термодинамики. Применение уравнения баланса энтропии к океану [Кильматов, 1984; Shimokawa, Ozawa, 2001; Bannon, Najjar, 2018; Кильматов, Рудых, 2025] как отдельному компоненту климатической системы возможно только в определенном приближении, поскольку рассмотрение океана как замкнутой термодинамической системы имеет свои особенности. Через границы океана поступают тепловые потоки с поверхности, наблюдаются геотермальные потоки на дне. Также генерируется поток тепла в толще океана вследствие диссипации работы ветра, приливной энергии. Одновременно происходит обмен массой, поверхность характеризуется неравномерным распределением осадков — испарения, плюс поток массы вследствие стока (рек), образования и таяние льдов. В работе будем выделять компоненту потока энтропии вследствие потока массы, т.е. галинную составляющую. Здесь важно, что поток энтропии оценивается через граничные параметры без учета внутренней структуры объекта [Глендсдорф, Пригожин, 1973], что позволяет проводить расчеты по стандартным гидрометеорологическим параметрам. Физически галинная составляющая потока характеризует меру отклонения пространственного поля солёности от своего равновесного (однородного) состояния. Чем значительнее галинный поток энтропии, тем больше его вклад в динамические процессы в океане, генерированные неоднородностью поля солёности.

Ниже построены простые инженерные формулы для расчета галинной составляющей потока энтропии вследствие обмена массой в системе океан–атмосфера–континент. Используются данные по термодинамическим свойствам морской воды [Fofonoff, 1962; IOC, SCOR and IAPSO, 2010*; Feistel, 2018]. В формулы входят только стандартные океанологические параметры, позволяющие проводить количественные оценки. Демонстрируется практический пример расчета декадной изменчивости интегрального галинного потока энтропии для выделенной акватории Тихого океана с помощью открытых источников гидрометеорологических данных [Kanamitsu et al., 2002; <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/GODAS/>; <https://apdrc.soest.hawaii.edu/data/data.php>].

Блоковая модель и инженерная формула для расчета галинного потока энтропии

Рассмотрим простую модель для расчета потока энтропии, генерированной потоком массы. Поток тепла при этом не учитывается. Морская вода рассматривается как двухкомпонентная жидкость — пресная вода плюс морская соль. Используем линейное приближение для формулы зависимости химического потенциала от солёности морской воды. Считаем также, что выделенная конечная акватория за заданный шаг времени (ниже декада — десять лет) находится в квазистационарном состоянии, т.е. внутренняя энергия выделенного объема не изменяется. Процесс изотермический при постоянном атмосферном давлении, суммарный поток массы в акваторию равен нулю. Поскольку суммарный поток массы равен нулю, сумма интегральных потоков испарения E ($\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$), осадков P ($\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$), стока (расход рек, таяние льда и т.д.) $Flow = (E - P)$ равна нулю. Таким образом, здесь не учитываются климатические вариации уровня океана. Потоки направлены перпендикулярно поверхности океана и положительны, когда испарение превышает осадки (поток соли направлен в океан). Введем обозначение: $(E - P)^+ > 0$, $(E - P)^- < 0$. Индекс (+) означает, что данный параметр принадлежит той части акватории, где поток соли направлен в океан. Знак (–) — осадки в данной части акватории доминируют. Обозначим S (г/кг) — средняя солёность поверхностной морской воды в выделенной акватории. Как правило, в акваториях, где преобладает испарение, соле-

* IOC, SCOR and IAPSO, 2010. The international thermodynamic equation of seawater — 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides № 56. English: UNESCO. 196 p.

ность поверхностной воды выше, чем в акваториях, где преобладают дожди и $(E - P)^- < 0$. Обозначим $\Delta S^+ \geq 0$ — отклонение солёности от средней S в той части акватории, где преобладает испарение. Соответственно $\Delta S^- \leq 0$ — отклонение солёности на поверхности океана от средней в акваториях, где доминируют осадки. Также отметим, что часть пресной воды (порядка 10 % от испарившейся) попадает в океан в виде стоков и таяния льда. Разделим акваторию на два блока по признаку преобладания испарения (+) и доминированию осадков (−). Интегральный обмен массой для акватории с учетом стоков в стационарном случае равен нулю. В соответствии с неравновесной термодинамикой [Гленсдорф, Пригожин, 1973; Седов, 1973] для конечной акватории интенсивность потока энтропии определяется пространственной неравномерностью распределения поля солёности и притока — оттока массы на поверхности.

В перечисленных приближениях построим простую блочную модель для практического расчета галинной составляющей энтропии, входными данными для которой являются стандартные гидрометеорологические данные. Схематически модель представлена на рис. 1.

Рис. 1. Блочная модель акватории, которая обменивается массой. В блоке (+) доминирует испарение (как правило, тропическая зона), здесь поток соли положительный. Солёность выше средней S на величину ΔS^+ . Блок (−) характеризует акватории с отрицательным потоком соли (осадки), $\Delta S^- < 0$. Интегральный баланс соли (с учетом стока) в стационарном приближении равен нулю

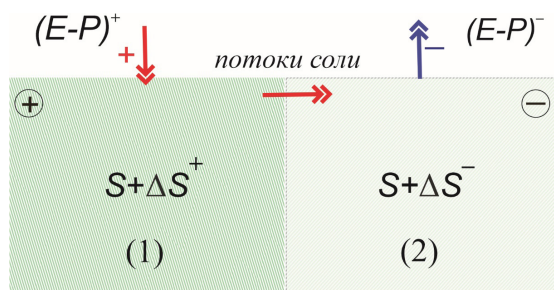


Fig. 1. The block model of a marine area undergone to the mass exchange. Evaporation prevails over precipitation in the block (+) where salinity is higher than the average salinity S by ΔS^+ and the salt flux is positive. Precipitation and river discharge prevail over evaporation in the block (−) where $\Delta S < 0$ and the salt flux. The net salt balance is zero

Приведем расчетные формулы, основанные на соотношении Гиббса в приближении морской воды как двухкомпонентной жидкости — чистая вода плюс соль. Используем следующие приближения: давление постоянное атмосферное; химические потенциалы морской воды — это линейные функции солёности; уравнение состояния морской воды [по: Fofonoff, 1962; IOC, SCOR and IAPSO, 2010*; Feistel, 2018]. В данном подходе отрицательный галинный поток энтропии e поддерживает пространственный перепад солёности $\Delta S^+ - \Delta S^-$ между блоками, т.е. компенсирует сглаживание поля солёности вследствие динамических процессов адвекции и турбулентного перемешивания.

Формула для расчета галинного потока энтропии e в перечисленных приближениях имеет следующий вид

$$e = -\frac{\Delta\mu(\Delta S^+) \cdot (E-P)^+}{T} + \frac{\Delta\mu(\Delta S^-) \cdot (E-P)^-}{T} - \frac{\Delta\mu(\Delta S^+) \cdot ((E-P)^+ + (E-P)^-)}{T}. \quad (1)$$

Здесь $\Delta\mu$ — разность химических потенциалов соли и пресной воды как функция солёности. Разлагая разность химических потенциалов в ряд в точке S , получаем простую линейную инженерную формулу для $\Delta\mu^*$:

$$\Delta\mu(\Delta S) \approx \frac{\partial\Delta\mu}{\partial\Delta S} \cdot \Delta S \approx 2400 \cdot \Delta S \text{ Дж/кг}. \quad (2)$$

Объединяя (1) и (2), получаем расчетную формулу для оценки галинного потока энтропии:

$$e \approx -2400 \left(\frac{\Delta S^+ \cdot (E-P)^+}{T} + \frac{\Delta S^- \cdot (E-P)^-}{T} - \frac{\Delta S^+ \cdot ((E-P)^+ + (E-P)^-)}{T} \right) \text{ Вт/м}^2\text{К}. \quad (3)$$

* IOC, SCOR and IAPSO, 2010.

Здесь надо отметить, что хотя используемое конкретное значение $\frac{\partial \Delta \mu}{\partial \Delta S}$ приближенное, это не влияет на выводы работы ниже, поскольку они основаны не на абсолютных значениях потока, а на тенденциях его изменения в декадных масштабах.

Рассмотрим структуру формул (1) и (3). Первый член в правой части — генерация потока вследствие притока массы (соли — преобладает испарение); второй — оттока соли (дожди); последний — вклад в галинный поток стока $Flow = (E - P)^+ + (E - P)^-$, который поступает в акваторию при солёности, отклоняющейся от S на $\Delta S^* \leq 0$. Ниже в практических расчетах полагаем $\Delta S^* = \Delta S^-$. Оценка $T \sim 290$ К.

Физическая интерпретация e следующая: это нормированная на температуру механическая энергия, которая продуцируется обменом массой с внешней средой вследствие пространственной неравномерности распределения разности испарения и осадков и поля солёности морской воды на поверхности.

Приведем количественный пример расчета для характерных значений параметров в океане. В тропиках характерная величина $(E - P)^+ \sim 0,5$ м/год $\sim 10^{-5}$ кг/м²·с. Если 10 % приходится на сток, то $Flow \sim -0,1 \cdot 10^{-5}$ кг/м²·с, $(E - P)^- \sim -0,9 \cdot 10^{-5}$ кг/м²·с. Средняя солёность $S \sim 35$ г/кг, порядка $\Delta S^+ \sim 1$ г/кг, $\Delta S^- \approx \Delta S^* \sim -0,5$ г/кг.

Подставляя эти значения в формулу (3), получаем $-e \approx 5 \cdot 10^{-5}$ Вт/м²·К.

Данный подход применим к выделенной акватории Тихого океана с целью оценить климатические сдвиги и вклад галинного потока в генерацию динамических процессов.

Оценка климатических вариаций галинного потока энтропии в акватории Тихого океана за последние 40 лет

В соответствии с представленным выше подходом был рассчитан суммарный поток энтропии для акватории Тихого океана по разрезу, ориентированному вдоль 180-го меридиана. Выбор акватории связан с относительным удалением от материков, а длина разреза охватывала высокие и низкие широты обоих полушарий.

Шаг по пространству вдоль разреза — 4°, количество шагов в северном полушарии — 13, в южном — 19. Разрез охватывает диапазон широт 50° с.ш. — 74° ю.ш. Осреднение по времени один год, период времени 40 лет (1984–2024 гг.). Ясно, что для каждого выделенного года суммарное число значений по температуре, солёности поверхностной воды, потока массы равно числу шагов, т.е. 32.

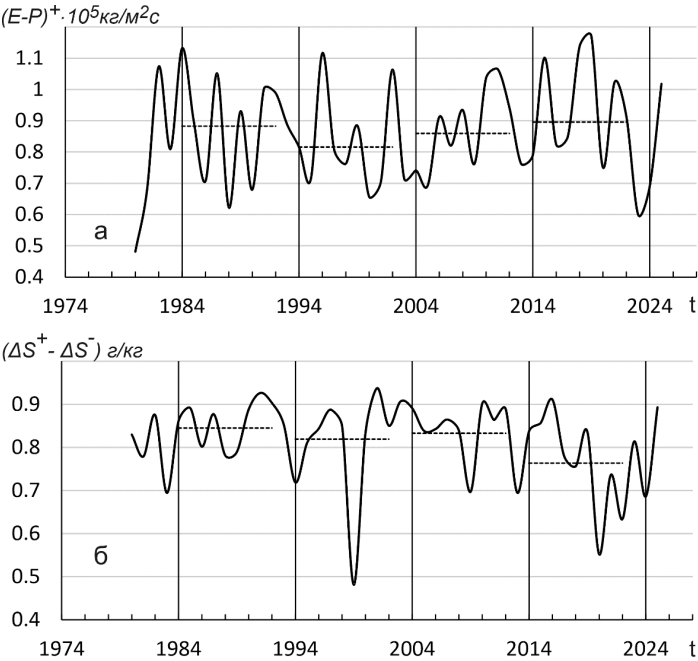
Исходные данные для расчетов получены с сайта NCEP Global Ocean Data Assimilation System (GODAS) (<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/GODAS/>) и в дальнейшем преобразованы с помощью ODV (Ocean Data View, <https://odv.awi.de>, 2026). Разность испарение–осадки получены с помощью ресурсов и web-инструментов регионального центра NOAA — Asia-Pacific Data Research Center, Honolulu [https://apdrc.soest.hawaii.edu/index.php\(netcdf/single_level/evaporation_minus_precipitation_\[cm_yr\],annual\)](https://apdrc.soest.hawaii.edu/index.php(netcdf/single_level/evaporation_minus_precipitation_[cm_yr],annual)).

Временная изменчивость и климатические изменения рассматриваемых характеристик

Ниже представлены результаты расчетов изменчивости параметров на разрезе 180°, которые связаны с генерацией галинного потока энтропии. На рис. 2 показан временной ход динамики потери массы на разрезе и пространственного перепада солёности морской воды между блоками. Графики показывают, что межгодовые изменения этих характеристик значительно превышают климатические тренды. Поэтому был реализован подход, предполагающий осреднение по времени на декады (десятилетия). Осреднение параметров для каждого блока отдельно: блок (+), где испарение превышает осадки (как правило тропическая зона); блок (–) с преобладанием осадков (экваториальная и субполярная зоны). В соответствии с рис. 1 знаки (+) (–) характеризуют направление вертикального потока соли в океан.

Рис. 2. Межгодовые и декадные (прямые горизонтальные линии) изменения положительного потока соли на разрезе 180° через поверхность акватории (а); межгодовые и декадные изменения среднего перепада солёности между акваториями с положительным (осадки – испарение < 0)⁺ и отрицательным (осадки – испарение > 0)⁻ потоком соли на разрезе 180° в поверхностном слое (б)

Fig. 2. Interannual dynamics of the positive salt flux through the sea surface at the transect along 180° and its decadal mean values (а); interannual dynamics and decadal mean values for the salinity difference between the blocks of transect with positive (precipitation < evaporation)⁺ and negative (precipitation > evaporation)⁻ salt fluxes (б)



На рис. 2 декадные изменения потока соли и разности солёности между блоками можно проследить по изменениям горизонтальных пунктирных линий. Такое осреднение позволяет более консервативно смотреть на тенденции изменения параметров в рамках блочной модели — вклад пространственного распределения разности испарения и осадков как в энергетическую галинную составляющую.

Результаты обработки данных суммированы в таблице.

Декадные изменения параметров на поверхности меридионального разреза 180° Тихого океана

Decadal changes of certain parameters for exchange through the sea surface at the meridian transect along 180° in the Pacific Ocean

№ строки	Параметр	Декада			
		1-я	2-я	3-я	4-я
1		1984–1993	1994–2003	2004–2013	2014–2023
2	(E–P)⁺ (10⁵ кг/м²·с)	0,883	0,816	0,860	0,896
3	(E–P) ⁻	-0,692	-0,707	-0,730	-0,759
4	Flow	0,191	0,109	0,130	0,137
5	S (г/кг)	34,654	34,655	34,656	34,660
6	ΔS ⁺	0,465	0,437	0,435	0,409
7	ΔS ⁻	-0,380	-0,382	-0,398	-0,355
8	ΔS ⁺ -ΔS ⁻	0,845	0,819	0,833	0,764
9	T (K)	290,835	290,958	291,053	291,319
10	T ⁺	295,076	295,817	295,974	296,449
11	T ⁻	287,400	286,645	286,495	286,773
12	T ⁺ -T ⁻	7,676	9,173	9,479	9,676
13	-ε (10⁵ Дж/м²·K)	6,173	5,532	5,927	5,662

Коротко выделим основные результаты анализа данных по таблице. Строки 2–4-я демонстрируют декадные изменения потоков соли в блоках и их разницы (Flow) в модельном приближении квазистационарного состояния за рассматриваемую декаду. Последние три декады наблюдается рост потока соли.

Строки 5–8-я характеризуют пространственное распределение и декадные изменения в поле поверхностной солёности воды. Отметим, что в рассматриваемом временном масштабе в блоках нет тенденции, что рост испарения приводит к росту солёности, а рост осадков — к уменьшению солёности воды. Это означает, что внутренние источники горизонтального перемешивания (адвекция, турбулентность) доминируют над генерацией пространственных градиентов солёности под воздействием разности осадков и испарения. Эту тенденцию подтверждают строки 9–12-я, показывающие климатические декадные изменения пространственного распределения температуры. Здесь важно, что акватория имеет не только тренд климатического потепления (строка 9-я), но одновременно и тренд роста разности температур между блоками (строка 12-я). Это характеризует климатический рост производства энтропии вследствие тепловых процессов, что согласуется с результатами расчетов для данной акватории [Кильматов, Рудых, 2025], он имеет оценку 10^{-2} Дж/м²К. Сравнение с галинным потоком (строка 13-я) показывает, что приток механической энергии (на единицу температуры) за счет галинного эффекта не превышает 1 % от генерации потока энтропии, генерированной пространственной неравномерностью нагрева — охлаждения на поверхности. Таким образом, минимальный вклад обмена массой (1 %) в процесс динамического перемешивания океана и одновременно его определяющее участие в гидрологический цикл планеты можно сравнить с эффектом влияния специй в кулинарии: малый объем сильно изменяет «вкусовые качества».

Заключение

Применение второго закона термодинамики в процессе обмена массой между океаном и атмосферой, оценка галинного потока энтропии через стандартные гидрометеорологические параметры позволяют получить дополнительную информацию по климатической изменчивости энергетических действий в океане. Несмотря на присутствие полуэмпирических коэффициентов в формулах, что приводит к оценочным значениям абсолютных величин, относительные изменения потока энтропии отражают реальные тенденции энергетических преобразований в океане в климатических масштабах.

Расчет галинного потока для меридионального разреза 180° Тихого океана показывает, что он с точки зрения динамического вклада в динамику океана играет второстепенную роль. Галинный поток составляет порядка 1 % от потока энтропии вследствие обмена теплом на границе океан–атмосфера. Поскольку суммарный отрицательный поток энтропии (за счет тепло-массообмена) в климатическом масштабе растет, то в целом это положительный стабилизирующий эффект поддержания климатической системы в стационарном состоянии.

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 гос. заданий ТОИ ДВО РАН: Государственное задание «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., according to the state assignments «The 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 “The study of structure and dynamics of waters in the World Ocean in 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, интерпретация результатов, написание текста работы; Н.И. Рудых — сбор, обработка, анализ данных, интерпретация результатов.

T.R. Kilmатов — 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

Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций : моногр. : пер. с англ. — М. : Мир, 1973. — 280 с.

Дьярмати И. Неравновесная термодинамика. Теория поля и вариационные принципы : моногр. — М. : Мир, 1974. — 404 с.

Кильматов Т.Р. Средний поток энтропии через поверхность Мирового океана // ДАН СССР. — 1984. — Т. 275, № 4. — С. 1015–1018.

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

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.

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.

Feistel R. Thermodynamic properties of seawater, ice and humid air: TEOS-10, before and beyond // Ocean Science. — 2018. — Vol. 14(3) — P. 471–502. DOI: 10.5194/os-14-471-2018.

Fofonoff N.P. Physical properties of sea water // The Sea. Ideas and observations on progress in the study of the seas, vol. 1 : Physical Oceanography. — N.Y. : Interscience (Wiley), 1962. — P. 3–30.

Ghill 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. EDN: YOJYTF.

Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J. et al. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) // Bull. Amer. Meteor. Soc. — 2002. — Vol. 83, № 11. — P. 1631–1644. DOI: 10.1175/BAMS-83-11-1631.

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. EDN: PKIYYJ.

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. EDN: NLALQJ.

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. EDN: PKIJBV.

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, № 5–6. — P. 1189–1206. DOI: 10.1007/s00382-009-0718-1. EDN: OMJXAV.

Shimokawa S., Ozawa H. On the thermodynamics of the oceanic general circulation: entropy increase rate of an open dissipative system and its surroundings // *Tellus*. — 2001. — Vol. 53 A, № 2. — P. 266–277. DOI: 10.3402/tellusa.v53i2.12185.

References

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.

Gyarmati, I., *Non-equilibrium thermodynamics. Field theory and variational principles*, Heidelberg: Springer Berlin, 1970.

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.

Kilmatov, T.R. and 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. doi 10.26428/1606-9919-2025-205-728-736. EDN: MDSIMQ

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.

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

Feistel, R., Thermodynamic properties of seawater, ice and humid air: TEOS-10, before and beyond, *Ocean Science*, 2018, vol. 14, no. 3, pp. 471–502. doi 10.5194/os-14-471-2018

Fofonoff, N.P., Physical properties of sea water, in *The Sea. Ideas and observations on progress in the study of the seas*, vol. 1: Physical Oceanography, New York: Interscience (Wiley), 1962, pp. 3–30.

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. . EDN: YOJYTF

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), *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2002, vol. 83, no. 11, pp. 1631–1644. doi 10.1175/BAMS-83-11-1631

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. EDN: PKIIFY

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. EDN: NLALQJ

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. EDN: PKIJBV

Pascale, S., Gregory, J.M., Ambaum, M., and Tailleux, R., Climate entropy budget of the Had-CM3 atmosphere–ocean general circulation model and of FAMOUS, its low-resolution version, *Climate Dynamics*, 2011, vol. 36, no. 5–6, pp. 1189–1206. doi 10.1007/s00382-009-0718-1. EDN: OMJXAV

Shimokawa, S. and Ozawa, H., On the thermodynamics of the oceanic general circulation: entropy increase rate of an open dissipative system and its surroundings, *Tellus*, 2001, vol. 53 A, no. 2, pp. 266–277. doi 10.3402/tellusa.v53i2.12185

IOC, SCOR and IAPSO, 2010. *The international thermodynamic equation of seawater — 2010: Calculation and use of thermodynamic properties*, Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides, no. 56. English: UNESCO. Cited March, 29, 2026.

NCEP Global Ocean Data Assimilation System (GODAS). <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/GODAS/>. Cited March, 29, 2026.

APDRC (Asia-Pacific Data Research Center). <https://apdr.csoest.hawaii.edu/data/data.php>. Cited March, 31, 2026.

<https://apdr.csoest.hawaii.edu/index.php>. Cited March, 29, 2026.

<https://odv.awi.de>. Cited March, 29, 2026.

Поступила в редакцию 9.04.2026 г.

После доработки 8.06.2026 г.

Принята к публикации 15.06.2026 г.

*The article was submitted 9.04.2026; approved after reviewing 8.06.2026;
accepted for publication 15.06.2026*