

УДК 551.465.7:551.513.22:[551.510.41:546.264-311] doi: 10.33933/2713-3001-2022-66-51-70

**О межгодовой изменчивости
наиболее интенсивных очагов источников и стока CO₂
в океане на основе данных наблюдений**

В.Н. Малинин¹, П.А. Вайновский²

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, malinin@rshu.ru

² ООО «Прогноз», Санкт-Петербург

В статье выполнен статистический анализ межгодовой изменчивости потока CO₂ в наиболее интенсивных очагах его выделения (область Эль-Ниньо — Южное колебание, ЭНЮК) и поглощения (севернее 36° Северная Атлантика) в океане на основе данных наблюдений за период 1983—2016 гг. Показано, что усредненный по области ЭНЮК поток CO₂ во время Эль-Ниньо резко усиливается, а во время Ла-Нинья также резко ослабевает. В Северной Атлантике абсолютный максимум поглощения CO₂ океаном отмечается на широте 60° с.ш. вблизи побережья Гренландии. Выявлен вклад температуры воды и климатических индексов на изменчивость потока CO₂. Установлено наличие отрицательной значимой связи между потоками CO₂ в ЭНЮК и Северной Атлантике.

Ключевые слова: Северная Атлантика, ЭНЮК, поток CO₂, межгодовая изменчивость, тренды.

**On the interannual variability of the most intense sources and
sinks of CO₂ in the ocean based on observational data**

V.N. Malinin¹, P.A. Vainovsky²

¹ Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russia

² LLC “Prognoz”, Saint Petersburg, Russia

The article presents the statistical analysis of the interannual variability of the CO₂ flux in the most intense sources of its release (El Niño–Southern Oscillation, ENSO) and absorption (water area north of 36° North Atlantic) in the ocean based on observational data for 1983—2016. For this purpose, the Global Surface pCO₂ Database V2016 at Lamont–Doherty Earth Observatory (LDEO) database was used. The maximum estimates of CO₂ emissions into the atmosphere are observed near the coast of South America. Averaged over the ENSO region, the CO_{2,av} flux has a significant positive trend and a high correlation with the ENSO indices. Therefore, during El Niño, it sharply increases, during La Niña, also sharply weakening. This made it possible to build a regression model based on the easily determined indices of MEI, N₃₊₄, N₁₊₂, allowing to calculate the flux of CO_{2,av} released into the atmosphere with high accuracy. In the North Atlantic, the absolute maximum absorption of CO₂ by the ocean is at a latitude of 60° N off the coast of Greenland, its maximum trend being observed in the Labrador Sea. The contribution of water temperature and climatic indices to the variability of the CO₂ flux is revealed. A negative significant relationship has been established between the CO₂ fluxes in the ENSO and the North Atlantic, which is associated with the presence of trends. Their comparison showed that the rate of CO₂ uptake in the North Atlantic is 2 times faster than the release of CO₂ into the atmosphere in the ENSO region. It is quite obvious that the sources and sinks of CO₂ through the

ocean surface considered in this paper are primarily due to regional processes of interaction between the ocean and the atmosphere.

Keywords: North Atlantic, ENSO, CO₂ flux, interannual variability, trends.

For citation: *V.N. Malinin, P.A. Vainovsky.* On the interannual variability of the most intense sources and sinks of CO₂ in the ocean based on observational data. *Gidrometeorologiya i Ekologiya. Journal of Hydrometeorology and Ecology.* 2022, 66: 57—70. [In Russian]. doi: 10.33933/2713-3001-2022-66-51-70

Введение

Углеродный цикл — это глобальный круговорот потоков CO₂, метана и других малых углеродосодержащих газов в климатической системе Земли. Он имеет исключительное значение в понимании проблем, связанных с современным изменением климата, которое выражается в виде глобального потепления и обычно характеризуется трендом годовых значений осредненной для земного шара температуры воздуха. Главная причина современного потепления, по мнению экспертов МГЭИК [1], — это усиление парникового эффекта (ПЭ) вследствие экспоненциального роста выбросов в атмосферу CO₂ за счет деятельности человека. Действительно, концентрация углекислого газа в атмосфере увеличилась примерно с 277 частей на миллион (ppm) в 1750 г. [2], который принимается за начало индустриальной эры, до 410 ppm в 2019 г. [3], т. е. возросла почти в 1,5 раза.

В общем случае уравнение глобального баланса CO₂ можно записать как:

$$E_{FOS} + E_{LUC} = G_{ATM} + S_{OCEAN} + S_{LAND} + B_{IM} \quad (1)$$

где члены уравнения слева означают эмиссию CO₂ в атмосферу за счет сжигания топлива (E_{FOS}) и изменений в землепользовании (E_{LUC}); G_{ATM} — накопление CO₂ в атмосфере; S_{OCEAN} и S_{LAND} — результирующий обмен CO₂ с атмосферой Мирового океана и биоты суши; B_{IM} — суммарная невязка расчетов компонент баланса. Подробные обзоры глобального углеродного баланса даются ежегодно, начиная с 2013 г. Последний обзор опубликован в 2021 г. [4]. Относительно надежные оценки отдельных компонент баланса CO₂ известны с 1960 г. В табл. 1 приводятся оценки глобальных источников и стоков CO₂ для периода 1960—2019 гг. в млрд т C/год (1 млрд т C·год⁻¹ = Пг C·год⁻¹ = 10¹⁵ г C·год⁻¹ ≈ 0,25 моль C·м⁻²·год⁻¹) по данным [5].

Таблица 1

Изменчивость глобальных источников и стоков потока CO₂ для периода 1960—2019 гг. в млрд т C/год по данным [5]

Variability of global sources and sinks of CO₂ flux for the period 1960—2019 in billion t C/year according to [5]

Источники	1960—69	1970—79	1980—89	1990—99	2000—09	2008—17	2019
Сжигание ископаемого топлива	3,0	4,7	5,4	6,3	7,7	9,4	9,7
Изменения в землепользовании	1,5	1,3	1,3	1,3	1,4	1,6	1,8
Суммарная эмиссия	4,5	5,9	6,7	7,6	9,1	10,9	11,5
Накопление в атмосфере	1,8	2,8	3,4	3,2	4,1	5,1	5,4
Поглощение океаном	1,0	1,3	1,7	2,0	2,1	2,5	2,6
Поглощение суши	1,3	2,1	2,0	2,6	2,9	3,4	3,1
Невязка	0,5	-0,2	-0,4	-0,1	0	-0,1	0,3

Как видно из табл. 1, в 1960-е гг. накопление CO_2 в атмосфере при суммарной эмиссии равной 4,5 млрд т С/год составляло всего лишь 1,8 млрд т С/год. В дальнейшем происходил быстрый рост содержания CO_2 , прежде всего, за счет сжигания ископаемого топлива, вследствие чего оно увеличилось в 3 раза. При этом изменения в землепользовании остались практически на уровне 60-х годов. В результате относительный рост CO_2 в атмосфере $G_{\text{АТМ}} / (E_{\text{FOS}} + E_{\text{LUC}})$ повышался более медленными темпами. Одновременно с увеличением суммарной эмиссии происходило повышение поглощения CO_2 Мировым океаном (МО) и биотой суши (БС). Так, за рассматриваемый период поглощение CO_2 БС повысилось почти в 3 раза, а поглощение CO_2 океаном — в 2,5 раза. Отсюда следует, что МО и БС ослабляют рост CO_2 в атмосфере и в определенной степени служат *стабилизатором* ПЭ в климатической системе.

Но если рост поглощения CO_2 биотой суши понятен и прозрачен, поскольку он связан с заметным усилением процесса фотосинтеза, то повышение поглощения CO_2 океаном в работе [5] не объясняется. Известно, что рост температуры поверхности океана и его теплосодержания хорошо выражен [6, 7], а в этом случае поглощение CO_2 должно уменьшаться.

Отметим, что БС и МО являются не только стоками, но также источниками потоков CO_2 для атмосферы. Результирующий поток углерода между атмосферой и наземными экосистемами определяется фотосинтезом за вычетом дыхания растений (автотрофного дыхания), выделения в атмосферу CO_2 при разложении органического вещества и при природных пожарах [8].

Поток углекислого газа (на единицу площади) из атмосферы в океан описывается законом Генри:

$$f_o = k\text{CO}_2 \alpha (p\text{CO}_{2,a} - p\text{CO}_{2,o}), \quad (2)$$

где $k\text{CO}_2$ — коэффициент обмена, который зависит от скорости ветра в приводном слое и характеристик устойчивости этого слоя, α — растворимость CO_2 в морской воде, $p\text{CO}_{2,o}$ и $p\text{CO}_{2,a}$ — парциальное давление CO_2 в воде и в воздухе соответственно. Парциальное давление CO_2 в воздухе ($p\text{CO}_{2,a}$) в соответствии с уравнением состояния идеального газа линейно связано с содержанием CO_2 в атмосфере. Таким образом, повышение концентрации CO_2 в атмосфере приводит к поглощению его океаном, а уменьшение — к выделению углекислого газа из океана. Растворимость CO_2 в морской воде уменьшается при увеличении температуры.

Согласно (2) поглощение углекислого газа морской водой происходит в регионах, где $p\text{CO}_{2,o} < p\text{CO}_{2,a}$. Это происходит при переносе морской воды от поверхности океана вглубь, например, в средних широтах Северного и Южного полушарий, а также в регионе Атлантики к югу от Гренландии. Углекислый газ выделяется из океана в атмосферу в регионах, где восходящие течения выносят из глубины на поверхность богатую CO_2 морскую воду в тропиках, в Южном океане и на северо-западе Тихого океана [8].

В работах [9, 10] показано, что зонально-осредненный поток CO_2 направлен в атмосферу в приэкваториальных широтах (18° ю.ш. — 14° с.ш.), с максимальными значениями вблизи 8° ю.ш. В средних и высоких широтах результирующий поток CO_2 направлен в океан. Наибольшее значение поглощения потока CO_2

в Южном полушарии отмечается в зоне $38\text{--}42^\circ$ ю.ш., а в Северном полушарии он достигает абсолютного максимума в широтном поясе $66\text{--}70^\circ$ с.ш., т. е. вблизи границы Северной полярной области. По разным оценкам МО выделяет в атмосферу 78 [8] — 90 [11] ПгС год^{-1} , а поглощает 80 [8] — 92 ПгС год^{-1} [11].

На рис. 1 приводится пространственное распределение результирующего среднесноголетнего годового потока CO_2 между океаном и атмосферой за период $1982\text{--}2007$ гг. [12]. Данная карта стала итогом гигантской работы группы исследователей, обработавших многомиллионные серии измерений $p\text{CO}_2$. Как видно из рис. 1, самый мощный очаг выделения CO_2 в атмосферу приурочен к области действия явления Эль-Ниньо, а более мелкие локальные очаги находятся в северо-западной части Аравийского моря и в районе южнее экватора в Атлантическом океане, примыкающим к побережью Бразилии. Как и следовало ожидать, значительно более обширными являются очаги поглощения CO_2 . Максимальный очаг приурочен к умеренным и высоким широтам Северной Атлантики (севернее 40°). Другие очаги поглощения CO_2 концентрируются вдоль 40° южного полушария и северной части Тихого океана.

В дальнейшем подобные карты строились неоднократно, но все они принципиально не отличаются от карты на рис. 1. На рис. 2 представлена карта среднесноголетнего годового потока CO_2 для МО за $2011\text{--}2020$ гг. [4]. Нетрудно видеть, что заметно расширились и усилились очаги выделения CO_2 в атмосферу, в частности в Атлантике. Одновременно существенно увеличился очаг поглощения CO_2 в Северной Атлантике, но несколько ослаб очаг в северной части Тихого

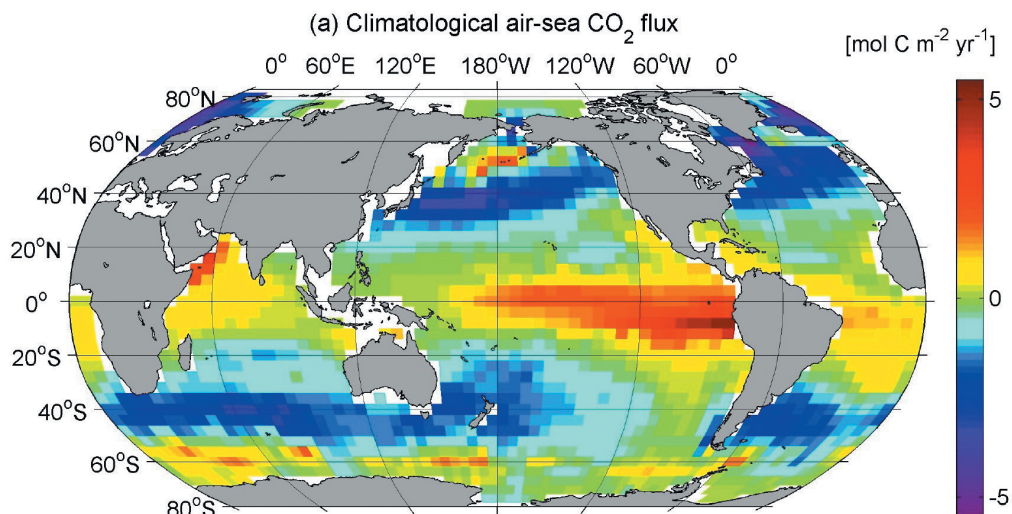


Рис. 1. Результирующий среднесноголетний поток CO_2 между океаном и атмосферой за период $1982\text{--}2007$ гг. в моль $\text{C m}^{-2} \text{год}^{-1}$ [12].

Fig. 1. The resulting average long-term CO_2 flux between the ocean and the atmosphere for the period $1982\text{--}2007$ in $\text{mol C m}^{-2} \text{year}^{-1}$ [12].

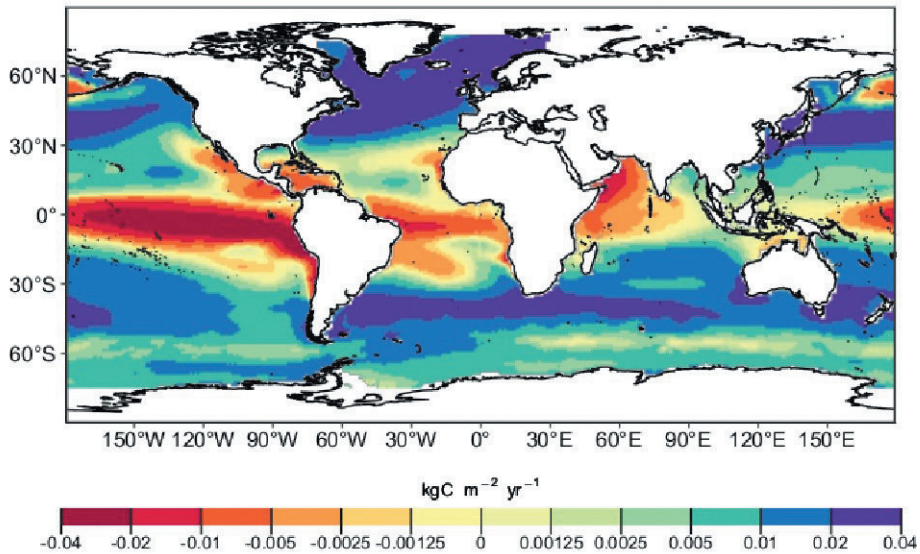


Рис. 2. Результирующий среднемноголетний поток CO₂ между океаном и атмосферой за период 2011—2020 гг. в кгС м⁻² год⁻¹ [4]. Положительные потоки CO₂ означают поглощение их океаном.

Fig. 2. The resulting average long-term CO₂ flux between the ocean and the atmosphere for the period 2011—2020 in kg C m⁻² year⁻¹ [4]. Positive CO₂ fluxes means their absorption by the ocean.

океана. Очевидно, повышение потока CO₂ в атмосферу связано с общим потеплением поверхности океана. Цель данной работы состоит в анализе межгодовой изменчивости наиболее интенсивных очагов выделения (район Эль-Ниньо — Южное колебание, ЭНЮК) и поглощения (севернее 40° CA) CO₂ в океане на основе данных наблюдений.

Материалы и методы

В настоящее время главным источником данных о $p\text{CO}_2$ является глобальный проект SOCAT (Surface Ocean CO₂ Atlas), который объединил в едином формате все общедоступные данные о $p\text{CO}_2$ для МО. Это позволило потребителям получать среднемесячные значения $p\text{CO}_2$ поверхностных вод океана на сетке 1°×1° без временной или пространственной интерполяции. Первая версия SOCAT была опубликована в 2011 г., последняя — в 2021 г., которая включает 30,6 млн измерений $p\text{CO}_2$ у поверхности океана с контролем качества с 1957 по 2020 г., а также откалиброванные данные датчиков. Подробная документация проекта SOCAT представлена в работе [13]. Составной частью SOCAT стала база данных Global Surface $p\text{CO}_2$ Database V2016 at Lamont–Doherty Earth Observatory (LDEO), созданная Taro Takahashi, которая к 2010 г. содержала до 3 млн измерений $p\text{CO}_2$ [14]. На основе этих данных группа исследователей осуществила расчет потоков CO₂

в узлах географической сетки с пространственным разрешением 4° широты \times 5° долготы за 1982—2007 гг. [15]. В данной работе использована именно эта база [14] за период 1983—2016 гг., поскольку пространственное разрешение 4° широты \times 5° долготы более рационально с точки зрения изучения крупномасштабной изменчивости потоков CO_2 .

Дополнительно в работе использовалась следующая информация:

— характеристики температуры воздуха (ТВ) и температуры поверхности океана (ТПО) были взяты из архива NCEP—DOE Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP-II) reanalysis (Reanalysis-2) [16], который охватывает спутниковый период наблюдений с 1979 г. по настоящее время с пространственным разрешением $1,9^\circ$ по широте и долготе;

— N_{3+4} — ТПО в районе, ограниченном 5° с.ш. — 5° ю.ш. и 120° з.д. — 170° з.д.;

— N_{1+2} — ТПО в районе, ограниченном 0 — 10° ю.ш. и 80° з.д. — 90° з.д.;

— SOI (South Oscillation Index) — индекс южного колебания, который рассчитывается как разность атмосферного давления между о. Таити и г. Дарвин на севере Австралии;

— MEI (multivariate ENSO index) — комплексный индекс, представляющий первую главную компоненту из шести метеорологических и океанологических параметров: давление на уровне моря, зональные и меридиональные компоненты поверхностного ветра, температура поверхности моря, температура поверхностного воздуха и облачность, среднемесячные значения которых выбираются из архива ICOADS с 1950 г.;

— API (atmospheric pressure index) — индекс силы экваториальной депрессии в Тихом океане, определяемый как аномалии атмосферного давления в регионе 5° с.ш. — 5° ю.ш., 35° в.д. — 25° з.д. [32];

— PDO (Pacific decadal oscillation) — индекс, характеризующий долгопериодную изменчивость ТПО в северной части Тихого океана;

— АМО (Атлантическая мультидекадная осцилляция) представляет долгопериодное изменение температуры поверхности в Северной части Атлантического океана (0 — 70° с.ш.);

— САК (Североатлантическое колебание) представляет собой разность атмосферного давления между Азорским максимумом и Исландским минимумом;

— АО (арктическая осцилляция) определяется как первая мода разложения на естественные ортогональные функции давления на уровне моря в Северном полушарии (20 — 90° с.ш.);

— W, S, E — формы атмосферной циркуляции Вангейгейма—Гирса для Атлантико-евразийского сектора северного полушария.

Особенности межгодовой изменчивости потока CO_2 в области ЭНЮК

Область ЭНЮК является уникальным гидрометеорологическим объектом. Она представляет собой самую крупную и наиболее мощную энергоактивную зону МО, которая имеет исключительно важное влияние на формирование долгопериодных колебаний погоды и короткопериодные колебания климата. Посредством атмосферных дальних связей ЭНЮК может в значительной степени влиять

на климатическую изменчивость во всем мире [17]. Подробный анализ дальних связей ЭНЮК с климатическими процессами за его пределами обсуждается в работе [18]. Однако эти связи абсолютно не касаются выделяемого океаном потока CO_2 в атмосферу, изучение колебаний которого практически не выходит за пределы данного региона. Можно назвать лишь работы [19, 20, 21], в которых рассматривается влияние фаз PDO (потепления / похолодания ТПО северной части Тихого океана) на изменчивость потока CO_2 . В работе [19] показано, что в междесятилетних колебаниях потока CO_2 ключевую роль играет скорость ветра, а влияние $\Delta p\text{CO}_2$ незначительно. В среднем за год с акватории ЭНЮК поток CO_2 в атмосферу составляет $0,44\text{--}0,52$ Пг $\text{C}\cdot\text{год}^{-1}$ [22, 23]. При этом его вклад в межгодовую изменчивость суммарного потока CO_2 в атмосферу с поверхности МО достигает 70 % [24, 25 и др.]. Отметим, что до настоящего времени сохраняются существенные неопределенности, особенно в междесятилетних вариациях потока CO_2 , из-за ограниченного временного диапазона наблюдаемых данных и недостаточной надежности биогеохимических моделей [23, 24, 26].

На рис. 3 приводится распределение годовых значений потока CO_2 в атмосферу в пределах тропической зоны Тихого океана за период 1983—2016 гг. Нетрудно видеть, что очаг наибольших значений потока CO_2 вытянут от 170° з.д. к побережью Америки с небольшим наклоном к югу. При этом очаг имеет ячеистую структуру и состоит из 4 районов. Максимальные оценки потока CO_2 отмечаются в двух восточных районах. В каждом из районов были выделены центры с наибольшим потоком CO_2 и для них рассчитаны статистические характеристики, которые представлены в табл. 2.

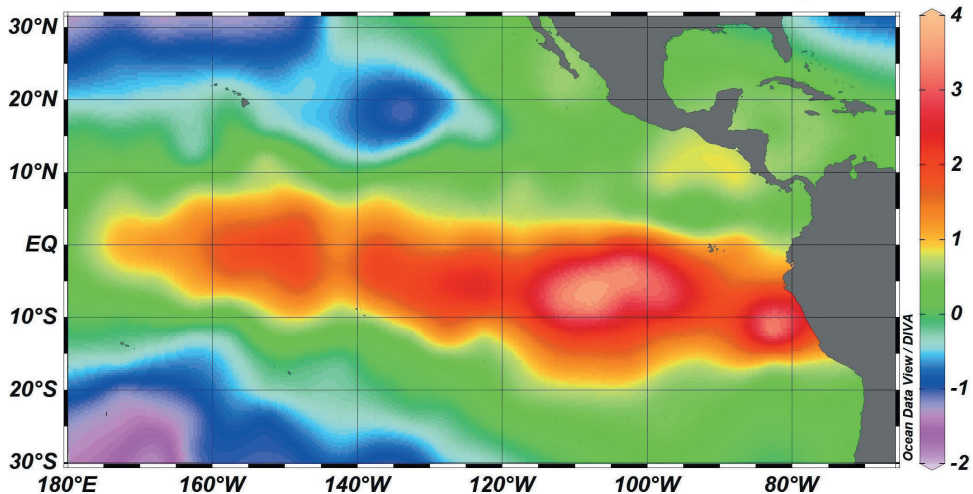


Рис. 3. Пространственное распределение среднееголетнего потока CO_2 в атмосферу с акватории океана в области ЭНЮК за период 1983—2016 гг. в $\text{mol C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$.

Fig. 3. Spatial distribution of the average long-term CO_2 flux into the atmosphere from the ocean in ENSO for the period 1983—2016 in $\text{mol C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{year}^{-1}$.

Распределение статистических характеристик временных рядов с наибольшим потоком CO_2 в центрах районов на рис. 2 ($X_{\text{ср}}$ — среднее арифметическое, СКО — среднее квадратическое отклонение, Tr — оценка тренда, R^2 — оценка вклада в дисперсию исходных рядов) и коэффициентов корреляции между годовым значениями (нижний треугольник) и среднемесячными значениями (верхний треугольник)

The distribution of statistical characteristics of time series with the highest CO_2 flux in the centers of regions in Fig. 2 ($X_{\text{ср}}$ — mean, СКО — standard deviation, Tr — trend estimate, R^2 — estimate of the contribution to the variance of the original series) and correlation coefficients between annual values (lower triangle) and monthly average values (upper triangle)

Координаты	$X_{\text{ср}}$	СКО	Tr , моль $\text{C}/\text{м}^2 \cdot \text{год}^2$	R^2	Коэффициенты корреляции			
4 с.ш., 147 з.д.	2,26	0,41	0	0	1	0,75	0,39	0,04
4 с.ш., 127 з.д.	2,75	0,38	0,61	0,05	0,66	1	0,68	0,01
8 с.ш., 107 з.д.	5,44	0,67	1,32	0,48	0,38	0,75	1	0,07
12 с.ш., 82 з.д.	5,46	0,58	0,63	0,24	0,60	0,69	0,73	1
ЭНЮК	2,10	0,22	0,34	0,19	0,81	0,86	0,82	0,87

Как видно из табл. 2, поток CO_2 в двух восточных районах в 2 раза больше, чем в западных. Межгодовая изменчивость в них тоже существенно выше. Значимые положительные тренды отмечаются только в восточных районах. Поскольку в восточной части ЭНЮК потоки CO_2 значительно отличаются от его левой части, то область ЭНЮК можно вполне объективно разделить на два квазиоднородных региона. Если же рассматривать степень статистической связности между районами, то здесь ситуация иная. Корреляция между всеми районами для годовых значений потока CO_2 , исключая ее между первым и третьим районами, довольно высокая и примерно одинаковая, причем с потоком CO_2 , осредненным для всей области ЭНЮК, она еще выше ($r > 0,80$). Это означает, что осредненный поток $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ довольно точно характеризует межгодовую изменчивость каждого из выделенных районов. Кроме того, потоку $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ свойствен значимый положительный тренд, формирующийся в восточной части ЭНЮК.

В ряде работ показано, что между выделяемым в атмосферу потоком CO_2 и ТПО в области ЭНЮК отмечается положительная корреляция (15, 19, 27 и др.]. На рис. 4 приводится межгодовой ход стандартизированных (безразмерных) значений $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ и индекса N_{3+4} , характеризующего ТПО между 120° з.д. — 170° з.д. Корреляция между $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ и N_{3+4} действительно довольно высокая ($r = 0,74$). С повышением ТПО поток CO_2 в атмосферу увеличивается. Важно, что практически все экстремумы обоих временных рядов почти совпадают. Это означает, что во время Эль-Ниньо поток $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ резко усиливается, а во время Ла Нинья также резко ослабевает. Различие между этими временными рядами состоит в том, что в N_{3+4} тренд отсутствует, а в $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ он есть.

Отметим, что был выполнен корреляционный анализ потока $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ с другими индексами ЭНЮК, а также с параметрами тепло и влагообмена в системе океан—атмосфера в зоне 20° с.ш. — 20° ю.ш. Тихого океана, заимствованными из работы [28]. Максимальная корреляция отмечается с индексом MEI ($r = 0,81$). Впрочем,

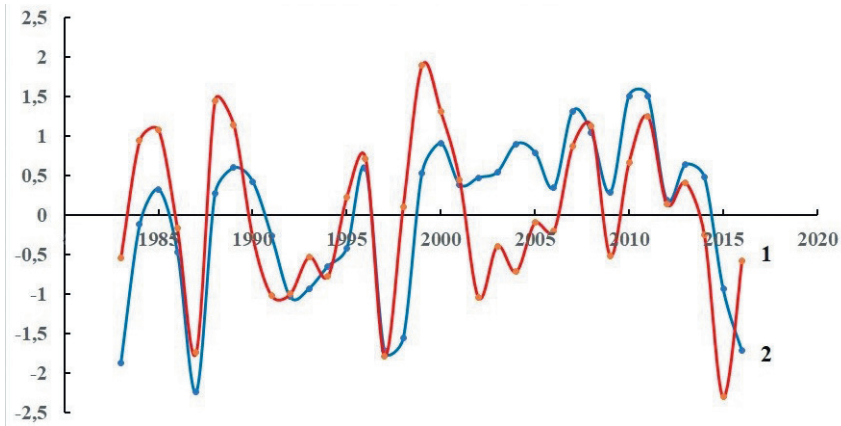


Рис. 4. Межгодовой ход стандартизированных значений ТПО в районе N_{3+4} (1) и потока $CO_{2,опр}$ в атмосферу (2).

Fig. 4. Interannual variation of standardized SST values in the region N_{3+4} (1) and $CO_{2,опр}$ to the atmosphere (2).

это понятно, поскольку он включает 6 основных параметров взаимодействия между океаном и атмосферой, в том числе скорость ветра в приводном слое, который напрямую используется для расчета потока CO_2 . Значимая корреляция ($r > 0,70$) имеет место для индексов SOI, N_{1+2} , а также для индекса PDO. Корреляция с параметрами зоны 20° с.ш. — 20° ю.ш. выявила значимую статистическую связь для ТПО, ТВ и ВА. Исходя из полученных результатов, был выполнен расчет пошаговой регрессионной модели методом включения с указанными выше параметрами. Уже на втором шаге $R^2 = 0,75$, на третьем $R^2 = 0,82$. На четвертом шаге увеличение R^2 идет на 0,01, а включаемая переменная становится незначимой по критерию Стьюдента. На наш взгляд, оптимальная модель регрессии может быть принята уже на втором-третьем шаге, т. е.

$$CO_{2,опр} = 5,22 + 1,50 MEI - 0,78 N_{3+4},$$

$$CO_{2,опр} = 3,54 + 1,30 MEI - 0,79 N_{3+4} + 0,34 N_{3+4}.$$

Стандартная ошибка оценки потока $CO_{2,опр}$ в долях СКО соответственно равна 0,44 и 0,36, т. е. является малой. Итак, по довольно легко определяемым индексам ЭНЮК можно с достаточной для практических целей точностью рассчитать выделяемый в атмосферу поток CO_2 .

Особенности межгодовой изменчивости потока CO_2 в акватории Северной Атлантики

Как было указано выше, акватория СА (севернее 36°) является самым интенсивным очагом стока CO_2 в океане, причем максимальные оценка поглощения CO_2 отмечаются в Гренландском, Норвежском морях и море Лабрадор. Межгодовая изменчивость потока CO_2 в пределах СА обсуждалась в ряде работ [15, 29—31],

причем наиболее подробно в работе авторов [32]. Обратимся к рис. 5, на котором дается карта среднемноголетнего годового результирующего потока CO_2 в СА за 1983—2016 гг. Нетрудно видеть, что выделяются два обширных очага максимальных значений поглощения океаном потока CO_2 . Первый — это Норвежское и Гренландское моря, на границе которых, севернее о. Ян-Майен, он превышает $5,2$ моль $\text{C}/\text{м}^2\cdot\text{год}$. Другой очаг — это море Лабрадор. Максимальные оценки потока CO_2 здесь отмечаются на широте 60° с.ш. вблизи южного побережья Гренландии, где они превышают 6 моль $\text{C}/\text{м}^2\cdot\text{год}$. Величина среднемноголетнего потока CO_2 в этом море и его межгодовая изменчивость выше, чем в Норвежском и Гренландском морях (табл. 3).

Обращают на себя внимание малые оценки поглощения CO_2 в море Ирмингера. Дополнительный анализ межгодовых колебаний потока CO_2 для этого моря показал знакопеременный характер газообмена. В течение 1983—1995 гг. отмечался поток CO_2 , направленный в атмосферу. Затем вплоть по 2014 г. включительно осуществлялось достаточно интенсивное поглощение его океаном. В последние два года (2015 и 2016 гг.) поток CO_2 опять был направлен вверх.

Как видно из табл. 3, наименьшая межгодовая изменчивость потока CO_2 , свойственна Норвежскому морю. В Гренландском море тренд отсутствует, т. е. межгодовые колебания потока CO_2 носят преимущественно случайный характер. Это связано с тем, что происходит компенсация положительных и отрицательных

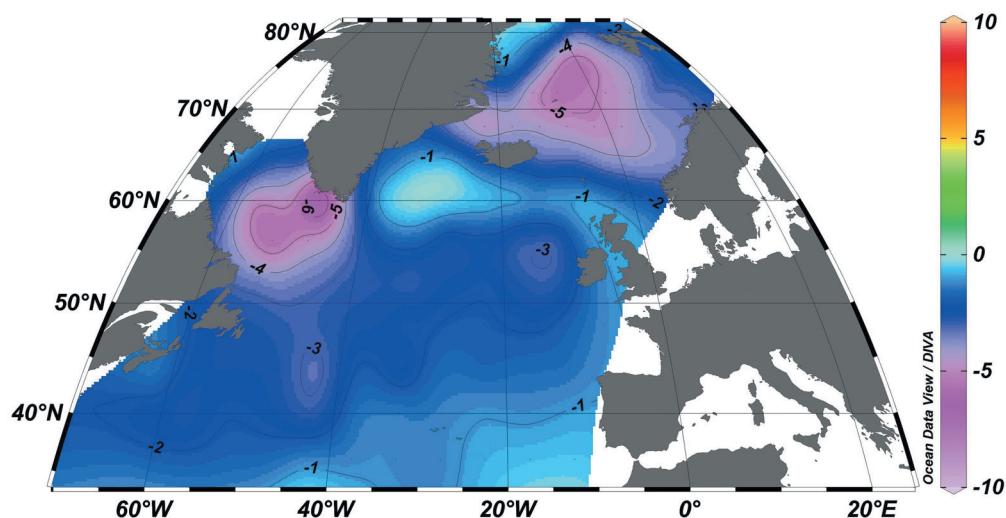


Рис. 5. Пространственное распределение среднемноголетнего годового результирующего потока CO_2 на акватории Северной Атлантики за 1983—2016 гг. в моль $\text{C}/\text{м}^2\cdot\text{год}$.

Знак минус означает поглощение потока CO_2 океаном.

Fig. 5. Spatial distribution of the mean long-term annual net CO_2 flux in the waters of the North Atlantic for 1983—2016 in $\text{mol C m}^{-2} \text{ year}^{-1}$.

The minus sign means the sink of the CO_2 flux by the ocean.

трендов, свойственных разным районам моря. Отметим, что наибольшая корреляция между потоками CO_2 имеет место между морями Лабрадор и Ирмингера ($r = 0,72$). Для осредненного потока $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ характерна тесная связь с Норвежским морем ($r = 0,81$) и морем Ирмингера ($r = 0,79$) и ее полное отсутствие с Гренландским морем ($r = 0,14$).

Таблица 3

Оценки статистических характеристик результирующего потока CO_2 и температуры поверхности воды осредненные по акватории морей Северной Атлантики за 1983—2016 гг.
Estimates of the statistical characteristics of the resulting CO_2 flux and water surface temperature averaged over the water area of the North Atlantic seas for 1983—2016.

CO_2 , море	Хср, моль $\text{C}/\text{M}^2 \cdot \text{год}$	СКО, моль $\text{C}/\text{M}^2 \cdot \text{год}$	Tr , моль $\text{C}/\text{M}^2 \cdot \text{год}^2$	R^2
Норвежское	-3,30	0,32	-0,0233	0,52
Гренландское	-3,07	0,44	0,0034	0,00
Лабрадор	-3,80	0,58	-0,0319	0,30
Ирмингера	-0,43	0,84	-0,0490	0,35
Северная Атлантика (36–80°)	-2,50	0,50	-0,0131	0,43

Обратимся к табл. 4, в которой приводятся оценки коэффициентов корреляции ряда гидрометеорологических параметров с потоками CO_2 для рассматриваемых морей. Наибольшее влияние температуры воды на изменчивость потока CO_2 имеет место в море Лабрадор ($r = -0,86$), наименьшее — в Гренландском

Таблица 4

Оценки выборочных коэффициентов корреляции потоков CO_2 в разных морях с гидрометеорологическими параметрами за 1983—2016 гг. [32] (курсивом отмечены значимые коэффициенты корреляции при уровне значимости $\alpha = 0,05$, превышающие $r_{кр} = 0,33$)
Estimates of sample correlation coefficients of CO_2 fluxes in different seas with hydrometeorological parameters for 1983—2016 [32] (significant correlation coefficients are marked in italics at a significance level of $\alpha = 0.05$, exceeding $r_{cr} = 0.33$)

Параметр	Результирующий поток CO_2 через поверхность воды				
	Норвежское море	Гренландское море	Море Лабрадор	Море Ирмингера	Северная Атлантика
Температура поверхности воды моря (акватории СА)	<i>-0,74</i>	<i>-0,51</i>	<i>-0,86</i>	<i>-0,79</i>	<i>-0,63</i>
Атлантическая мультидекадная осцилляция	<i>-0,72</i>	<i>-0,06</i>	<i>-0,42</i>	<i>-0,68</i>	<i>-0,58</i>
Арктическое колебание	-0,19	-0,32	0,32	0,31	0,04
Североатлантическое колебание	0,05	<i>-0,41</i>	<i>0,46</i>	<i>0,62</i>	0,22
Температура воздуха Арктики	<i>-0,69</i>	0,10	<i>-0,63</i>	<i>-0,53</i>	<i>-0,61</i>
Форма циркуляции W	<i>-0,57</i>	0,03	<i>-0,30</i>	<i>-0,31</i>	<i>-0,46</i>
Форма циркуляции С	<i>0,65</i>	<i>-0,02</i>	<i>0,35</i>	<i>-0,13</i>	<i>-0,22</i>
Давление в Исландском минимуме	0,10	0,33	<i>-0,32</i>	<i>-0,35</i>	<i>-0,02</i>

море ($r = -0,51$). Скорее всего, это связано с более значительной пространственной неоднородностью в распределении температуры воды, обусловленной соседством холодного Восточно-Гренландского течения и сравнительно теплых Западно-Исландского и Западно-Шпицбергенского течений, наличием циклонического круговорота вод и многочисленных фронтальных зон. Именно в этих морях за счет глубокой конвекции формируются холодные глубинные воды, которые распространяются в Южную Атлантику, т. е. дают начало глобальному конвейеру Брокера [33]. При этом очаги повышенного поглощения CO_2 в Гренландском море и особенно в море Лабрадор совпадают с зонами мощной осенне-зимней конвекции. Поскольку изменчивость температуры воды рассматривается в качестве показателя интенсивности глубокой конвекции [34], то это означает, что может отмечаться соответствие аномалий потока CO_2 и аномалий количества формирующейся глубинной водной массы в этих морях.

Помимо ТПО определенное влияние на поток CO_2 оказывают и другие гидрометеорологические процессы и параметры. Увеличение поглощения CO_2 в Норвежском море сопровождается ослаблением АМО, уменьшением температуры воздуха в Арктике, ослаблением атмосферной зональной циркуляции формы W и усилением меридиональной циркуляции формы C. Увеличение поглощения CO_2 в море Ирмингера происходит при усилении САК и ослаблении АМО. Значительно хуже связан с климатическими индексами поток CO_2 в Гренландском море. Так, при ослаблении САК происходит некоторое увеличение поглощения потока CO_2 в Гренландском море.

Дальние связи между ЭНЮК и Северной Атлантикой

Подробно дальние связи ЭНЮК с гидрометеорологическими процессами в СА обсуждаются в работе [18]. Несмотря на достаточно обширное число публикаций, посвященных этим дальним связям, в ряде работ приводятся свидетельства, что они оказываются довольно слабыми и во многих случаях сопоставимы с климатическим шумом [35, 36 и др.]. Возможно, поэтому И.В. Серых [18] обозначает эти связи как «кажущееся влияние ЭНЮК на Северную Атлантику». В настоящей работе на основе имеющихся данных была осуществлена проверка наличия статистически значимых связей между рассматриваемыми регионами. На рис. 6 представлен межгодовой ход результирующих потоков $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ в ЭНЮК и СА. Нетрудно видеть наличие между ними явно выраженной отрицательной значимой связи ($r = -0,60$). После исключения трендов корреляция становится незначимой ($r = -0,21$). Это означает, что «внутренняя» межгодовая изменчивость потоков $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ в этих областях МО, не связанная с трендами, обусловлена региональными процессами.

При этом каждому временному ряду потока $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ свойствен тренд: положительный для области ЭНЮК и отрицательный для области СА. Но интенсивность трендов разная. Для их сравнения оценим изменения потоков CO_2 за период 30 лет (1985—2015 гг.). За указанный период поток CO_2 в СА увеличивается на $0,40$ моль $\text{C}/\text{м}^2 \cdot \text{год}$, а в зоне ЭНЮК — на $0,20$ моль $\text{C}/\text{м}^2 \cdot \text{год}$. Отсюда видно, что

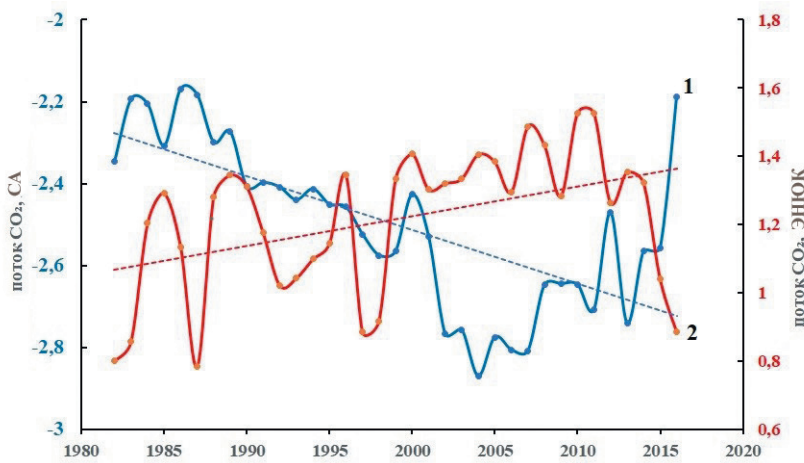


Рис. 6. Сопоставление межгодового хода результирующих потоков $\text{CO}_{2,\text{опр}}$ в СА (1) и ЭНЮК (2), в моль $\text{C}/\text{м}^2 \cdot \text{год}$.

Fig. 6. Comparison of the interannual course of the resulting $\text{CO}_{2,\text{опр}}$ fluxes, in the North Atlantic (1) and ENSO (2), in $\text{mol C m}^{-2} \text{ year}^{-1}$.

скорость поглощения CO_2 в СА идет в 2 раза быстрее выделения CO_2 в атмосферу в области ЭНЮК. Исходя из этих оценок, становится понятным ускорение поглощения CO_2 океаном (см. табл. 1) при общем росте потепления МО.

Проверка дальних связей влияния ЭНЮК на СА показала, что все они в статистическом плане являются не значимыми. Исключение составляет только отрицательная корреляция ($r = -0,62$) между PDO и АМО. Вероятно, влияние ЭНЮК на климат чуть ли не всего земного шара является преувеличением. Достаточно очевидно, что рассмотренные в данной работе источники и стоки CO_2 через поверхность МО обусловлены региональными процессами взаимодействия между океаном и атмосферой.

Заклучение

В данной работе проведен статистический анализ межгодовой изменчивости потока CO_2 в наиболее интенсивных очагах его выделения (область Эль-Ниньо — Южное колебание) и поглощения (севернее 36° — Северная Атлантика) в океане на основе данных наблюдений за период 1983—2016 гг. С этой целью использовалась база данных Global Surface $p\text{CO}_2$ Database V2016 at Lamont–Doherty Earth Observatory (LDEO) [14], которая имеет пространственное разрешение 4° широты $\times 5^\circ$ долготы. Кроме того, к анализу привлекались различные климатические индексы, описывающие ЭНЮК и СА.

Показано, что очаг максимальных потоков CO_2 в области ЭНЮК имеет ячеистую структуру и состоит из четырех квазигомогенных районов. Для двух восточных районов характерны более высокие оценки потоков CO_2 и положительные

тренды. Осредненный для области ЭНЮК поток $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ достаточно точно характеризует межгодовую изменчивость каждого из выделенных районов и имеет значимый положительный тренд. Наиболее высокая корреляция потока $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ отмечается с индексом MEI ($r = 0,81$), чуть ниже корреляция ($|r| > 0,70$) с индексами SOI, N_{1+2} , N_{3+4} и PDO. Поскольку экстремумы $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ почти совпадают с экстремумами индексов ЭНЮК, то это означает, что во время Эль-Ниньо поток $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ резко усиливается, а во время Ла-Нинья также резко ослабевает. Исходя из полученных результатов, по легко определяемым индексам MEI, N_{3+4} , N_{1+2} построена регрессионная модель, позволяющая с достаточно высокой точностью рассчитывать количество выделяемого в атмосферу $\text{CO}_{2,\text{оср}}$.

В СА абсолютный максимум поглощения CO_2 океаном отмечается на 60° с.ш. вблизи побережья Гренландии. Сильные отрицательные тренды, означающие усиление поглощения CO_2 океаном, свойственны Норвежскому морю и морю Лабрадор. В Гренландском море отрицательные и положительные тренды компенсируют друг друга, вследствие чего результирующий тренд оказывается близким к нулю. Выявлен вклад температуры воды и других гидрометеорологических параметров в изменчивость потоков CO_2 . Наиболее высокая корреляция с температурой воды отмечается для моря Лабрадор ($r = -0,86$), а наименьшая — для Гренландского моря ($r = -0,51$). В Норвежском море существенное влияние на поток CO_2 оказывают АМО, температура воздуха в Арктике и формы атмосферной циркуляции W и C.

Сопоставление результирующих потоков $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ в ЭНЮК и СА показало наличие между ними явно выраженной отрицательной значимой связи ($r = -0,60$), которая становится незначимой после исключения трендов ($r = -0,21$). Это означает, что «внутренняя» межгодовая изменчивость потоков $\text{CO}_{2,\text{оср}}$ в этих областях МО, не связанная с трендами, обусловлена региональными процессами. Тренды показывают увеличение выделения потока CO_2 в атмосферу в области ЭНЮК и поглощение его в области СА. Их сравнение выявило, что скорость поглощения CO_2 в СА идет в 2 раза быстрее выделения CO_2 в атмосферу в области ЭНЮК. Достаточно очевидно, что рассмотренные в данной работе источники и стоки CO_2 через поверхность океана обусловлены процессами взаимодействия между океаном и атмосферой и скорее всего не связаны с выбросами CO_2 в атмосферу за счет антропогенной деятельности.

Обратимся теперь к фундаментальному выводу, сформулированному в Пятом отчете МГЭИК (IPCC, 2013): «... в высшей степени вероятно (*extremely likely*, 95—100 %), что влияние человека является доминирующей причиной наблюдаемого потепления с середины XX столетия». Отсюда следует полное игнорирование природных (естественных) факторов в формировании глобального потепления, единственной причиной которого считаются выбросы CO_2 в атмосферу за счет человеческой деятельности. Но так ли это?

Парниковый эффект, обусловленный углекислым газом, состоит из двух компонент: естественной и антропогенной. Примем эмиссию CO_2 в атмосферу из МО и БС по данным [8, 11] равной 84 и 118 млрд т/год. Антропогенные выбросы равны примерно 9 млрд т/год. Даже без учета вулканических извержений и природных

лесных пожаров антропогенный вклад в ПЭ оказывается равным 4,5 %. Как известно, полное перемешивание в атмосфере в глобальном масштабе оценивается примерно неделей. Поэтому уже в течение месяца парниковые газы перемешиваются в атмосфере не менее четырёх раз. В связи с этим корректное разделение ПЭ на естественную и антропогенную компоненты практически нереально. Исходя из этого нельзя утверждать, что антропогенный CO_2 с его вкладом в ПЭ менее 5 % является доминирующим фактором глобального потепления.

Другое принципиально ошибочное суждение состоит в том, что, признавая доминирующий вклад водяного пара в ПЭ (до 75 %), эксперты МГЭИК [11] упорно утверждают, что вклад водяного пара в радиационный форсинг, а следовательно и в ПЭ, пренебрежимо мал, поэтому *увеличение концентрации водяного пара не является причиной процесса глобального потепления и, следовательно, полностью обусловлено положительной обратной связью между ними*. Но обратные связи, как мы знаем, предполагают взаимное влияние процессов друг на друга. В данном случае речь идет только об одностороннем влиянии температуры воздуха на влагосодержание атмосферы. Однако еще в 70-е годы нобелевский лауреат С. Манабэ [37] показал, что при удвоении концентрации CO_2 температура воздуха без учёта водяного пара (для сухой атмосферы) повышается на 1,3 °С, а при его учёте — на 2,3 °С, т. е. её рост идёт почти в 2 раза быстрее! По сути, влагосодержание атмосферы является значимым климатообразующим фактором и в значительной степени определяется не обратной связью с ТВ, а изменчивостью влагообмена в системе океан—атмосфера. Другие доказательства важной роли водяного пара в современных изменениях климата можно найти в [29, 38—40 и др.]

В действительности, формирование глобального потепления обусловлено внутренней изменчивостью климатической системы за счет процессов крупномасштабного взаимодействия между океаном и атмосферой и регулируется системой положительных и отрицательных обратных связей, причем положительные связи преобладают. Главенствующей является положительная обратная связь между влагосодержанием атмосферы и температурой воздуха. Роль углекислого газа состоит в том, что он является своеобразным катализатором глобального потепления. Его рост — это фактор усиления обратной положительной связи между температурой воздуха и влагосодержанием, не допускающий движения климатической системы в сторону похолодания [41].

Список литературы

1. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
2. Joos F., Spahni R. Rates of change in natural and anthropogenic radiative forcing over the past 20,000 years, P. Natl. Acad. Sci. USA. 2008. № 105. P. 1425—1430. doi: 10.1073/pnas.0707386105,
3. Dlugokencky E., Tans P. Trends in atmospheric carbon dioxide, National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory (NOAA/ESRL). Available at: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html> (accessed 16.11.2020).

4. Friedlingstein P., Jones M.W., O'Sullivan M. et al. Global Carbon Budget 2021 // *Earth System Science*. doi: 10.5194/essd-2021-386.
5. Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M.W. et al. Global Carbon Budget 2020 // *Earth Syst. Sci. Data*. 2020. № 12. P. 3269—3340. doi: 10.5194/essd-12-3269-2020.
6. Малинин В.Н. Уровень океана: настоящее и будущее. СПб.: РГГМУ, 2012. 260 с.
7. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. 3949 p.
8. Елисеев А.В. Глобальный цикл CO₂: основные процессы и взаимодействие с климатом // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2017. № 4. С. 5—27.
9. Карлин Л.Н., Малинин В.Н., Образцова А.А. Пространственно-временные изменения потока CO₂ в системе океан—атмосфера // *Изв. РГО*. 2012. Т. 144. Вып. 5. С. 27—36.
10. Karlin L.N., Malinin V.N., Gordeeva S.M. On the Influence of the Sea Surface Temperature on the Carbon Dioxide Exchange with the Atmosphere // *Oceanology*. 2015. Vol. 55, No. 1. P. 11—19.
11. IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Edited by Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2007. 996 p.
12. Park G., Wanninkhof R., Triñanes J. Procedures to create near real-time seasonal air-sea CO₂ flux maps // NOAA Technical Memorandum, OAR AOML-98. 2010. 14 p.
13. Bakker et al. A multi-decade record of high quality fCO₂ data in version 3 of the Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT) // *Earth System Science Data*. 2016. № 8. P. 383—413. doi: 10.5194/essd-8-383-2016.
14. Takahashi T., Sutherland S.C., Wanninkhof R. Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO₂, and net sea-air CO₂ flux over the global oceans // *Deep Res. Part II. Top Stud. Oceanogr*. 2009. № 56. P. 554—577. doi: 10.1016/j.dsr2.2008.12.009.
15. Park G.-H., Wanninkhof R., Doney S.C., Takahashi T., Lee K., Feely R.A., Sabine C.L., Trinanes J., Lima I.D. Variability of global net sea-air CO₂ fluxes over the last three decades using empirical relationships // *Tellus*. 2010. № 62B(5). P. 352—368.
16. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S-K, Hnilo J.J., Fiorino M., Potter G.L. NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2) // *Bul. of the Atmos. Met. Soc.* 2002. No. 83. P. 1631—1643.
17. McPhaden M.J. El Niño and La Niña: Causes and Global Consequences // *Encyclopedia of Global Environmental Change*. Vol. 1. Chichester, UK: John Wiley and Sons, LTD, 2002. P. 353—370.
18. Серых И.В. О роли Эль-Ниньо — Глобальной атмосферной осцилляции в межгодовой изменчивости гидрометеорологических процессов // *Гидрометеорология и экология*. 2021. № 63. С. 329—370.
19. Tian F., Zhang R.-H., Wang X. Factors affecting interdecadal variability of air-sea CO₂ Fluxes in the tropical Pacific, revealed by an ocean physical-biogeochemical model // *Climate Dynamics*, 2019. doi: 10.1007/s00382-019-04766-5.
20. Bordbar M.H., Martin T., Latif M., Park W. Role of internal variability in recent decadal to multidecadal tropical Pacific climate changes // *Geophys. Res. Lett.* 2017. № 44. P. 4246—4255. doi: 10.1002/2016GL072355.
21. England M.H., McGregor S., Spence P. et al. Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus. *Nat. Clim. Chang.* 2014. № 4. P. 222—227. doi: 10.1038/NCLIMATE2106.
22. Wang X., Murtugudde R., Hackert E., Wang J., Beauchamp J. Seasonal to decadal variations of sea surface pCO₂ and sea-air CO₂ flux in the equatorial oceans over 1984—2013: A basin-scale comparison of the Pacific and Atlantic Oceans // *Global Biogeochem. Cycles*. 2015. № 29(5). P. 597—609. doi: 10.1002/2014GB005031.
23. Ishii M., Feely R.A., Rodgers K.B. et al. Air-sea CO₂ flux in the Pacific Ocean for the period 1990—2009. *Biogeosciences*. 2014. №11. P. 709—734. doi: 10.5194/bg-11-709-2014.
24. Wanninkhof R., Park G.H., Takahashi T. et al. Global ocean carbon uptake: magnitude, variability and trends. *Biogeosciences*. 2013. № 10. P. 1983—2000. doi: 10.5194/bg-10-1983-2013.

25. Feely R.A., Takahashi T., Wanninkhof R. et al. Decadal variability of the air–sea CO₂ fluxes in the equatorial Pacific Ocean // *J. Geophys. Res.* 2006. 111:C08S90. doi: 10.1029/2005jg003129.
26. McKinley G.A., Fay A.R., Lovenduski N.S., Pilcher D.J. Natural variability and anthropogenic trends in the ocean carbon sink // *Ann. Rev. Mar. Sci.* 2017. № 9. P. 125—150. doi: 10.1146/annur-ev-marine-010816-060529.
27. Valsala V., Roxy M., Ashok K., Murtugudde R. Spatiotemporal characteristics of seasonal to multidecadal variability of pCO₂ and air–sea CO₂ fluxes in the equatorial Pacific Ocean // *J. Geophys. Res. Ocean.* 2014. № 119. P. 8987—9012. doi: 10.1002/2014JC010212. Received.
28. Малинин В.Н., Вайновский П.А. Влагодобмен между океаном и атмосферой во внутритропической зоне конвергенции // *Гидрометеорология и экология.* 2021. № 63. С. 255—278. doi: 10.33933/2074-2762-2021-63-255-278.
29. Benson N.U., Osibanjo O.O., Asuquo F.E., Anake W.U. Observed trends of pCO₂ and air–sea CO₂ fluxes in the North Atlantic Ocean // *International Journal of Marine Science.* 2014. Vol. 4, No. 72. P. 1—7. doi: 10.5376/ijms.2014.04.0072.
30. Breeden M.L., McKinley G.A. Climate impacts on multidecadal pCO₂ variability in the North Atlantic: 1948—2009 // *Biogeosciences.* 2016. № 13. P. 3387—3396.
31. De Vries T., Le Quéré, Andrews C., Berthet O., Hauck S., Ilyina J., Landschützer T., Lenton P., Lima A., Nowicki I.D., Schwinger M., Séférian J. Decadal trends in the ocean carbon sink // *P. Nat. Acad. Sci. USA.* 2019. № 116. P. 11646—11651. doi: 10.1073/pnas.1900371116.
32. Малинин В.Н., Вайновский П.А. Изменчивость обмена углекислым газом между океаном и атмосферой в Северной Атлантике // *Общество. Среда. Развитие.* 2021. № 4. С. 103—112.
33. Федоров А.М., Башмачников И.Л., Белоненко Т.В. Локализация областей глубокой конвекции в морях Северо-Европейского бассейна, Лабрадор и Ирмингер // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле.* 2018. Т. 63, Вып. 3. С. 345—362. doi: 10.21638/spbu07.2018.306.
34. Li F., Lozier M.S. On the linkage between Labrador Sea Water volume and overturning circulation in the Labrador Sea: a case study on proxies // *J. Climate.* 2018. № 31. P. 5225—5241. doi: 10.1175/JCLI-D-17-0692.1.
35. Rodriguez-Fonseca B., Suárez-Moreno R., Ayarzagüena B., López-Parages J., Gómara I., Villamayor J., Mohino E., Losada T., Castaño-Tierno A. A review of ENSO influence on the North Atlantic. A non-stationary signal. *Atmosphere.* 2016. № 7 (7). P. 87.
36. Broennimann S. Impact of El Niño–Southern Oscillation on European climate // *Rev. Geophys.* 2007. № 45. RG3003.
37. Manabe S. Role of greenhouse gas in climate change // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography.* 2019. № 71. P. 1, 1620078. doi: 10.1080/16000870.2019.1620078.
38. Логинов В.Ф., Лысенко С.А. Современные изменения глобального и регионального климата. Минск: Беларуская навука, 2019. 318 с.
39. Смирнов Б.М. Физика глобальной атмосферы. Парниковый эффект, атмосферное электричество, эволюция климата. М.: ИД Интеллект, 2017. 400 с.
40. Малинин В.Н., Гордеева С.М., Наумов Л.М. Влагодобренность атмосферы как климатообразующий фактор // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2018. Т. 15, № 3. С. 243—251. doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-243-251.
41. Малинин В.Н. Глобальный экологический кризис и климат // *Ученые записки РГТМУ.* 2017. № 48. С. 11—32.

References

1. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013: 1535 p.
2. Joos F., Spahni R. Rates of change in natural and anthropogenic radiative forcing over the past 20,000 years. *P. Natl. Acad. Sci. USA.* 2008, 105: 1425—1430. doi: 10.1073/pnas.0707386105.

3. *Dlugokencky E., Tans P.* Trends in atmospheric carbon dioxide, National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory (NOAA/ESRL). Available at: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html> (accessed 16.11.2020).
4. *Friedlingstein P., Jones M.W., O'Sullivan M. et al.* Global Carbon Budget 2021. *Earth System Science*. 2021. doi: 10.5194/essd-2021-386.
5. *Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M.W. et al.* Global Carbon Budget 2020. *Earth System Science Data*. 2020, 12: 3269—3340. doi: 10.5194/essd-12-3269-2020.
6. *Malinin V.N. Uroven' okeana: nastoiashchee i budushchee.* The ocean level: present and future. Saint-Petersburg: RGGMU, 2012: 260 p. [In Russian].
7. IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis.* Contribution of Working Group I to the P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.]. Cambridge University Press, 2021: 3949 p.
8. *Eliseev A.V.* Global CO₂ cycle: basic processes and interaction with climate. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya.* Fundamental and Applied Climatology. 2017, 4: 5—27. [In Russian].
9. *Karlin L.N., Malinin V.N., Obratsova A.A.* Spatio-temporal changes in the CO₂ flux in the ocean—atmosphere system. *Izvestiya RGO. Bulletin of RGS.* 2012, 144(5): 27—36. [In Russian].
10. *Karlin L.N., Malinin V.N., Gordeeva S.M.* On the Influence of the Sea Surface Temperature on the Carbon Dioxide Exchange with the Atmosphere. *Oceanology.* 2015, 55(1): 11—19.
11. IPCC. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis.* Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press. 2007: 996 p.
12. *Park G., Wanninkhof R., Triñanes J.* Procedures to create near real-time seasonal air-sea CO₂ flux maps. NOAA Technical Memorandum, OAR AOML-98. 2010: 14 p.
13. *Bakker et al.* A multi-decade record of high quality fCO₂ data in version 3 of the Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT). *Earth System Science Data.* 2016, 8: 383—413. doi: 10.5194/essd-8-383-2016.
14. *Takahashi T., Sutherland S.C., Wanninkhof R.* Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO₂ and net sea—air CO₂ flux over the global oceans. *Deep Res. Part II. Top Stud. Oceanogr.* 2009, 56: 554—577. doi: 10.1016/j.dsr2.2008.12.009.
15. *Park G.-H., Wanninkhof R., Doney S.C., Takahashi T., Lee K., Feely R.A., Sabine C.L., Trinanes J., Lima I.D.* Variability of global net sea-air CO₂ fluxes over the last three decades using empirical relationships. *Tellus.* 2010, 62B(5): 352—368.
16. *Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S-K, Hnilo J.J., Fiorino M., Potter G.L.* NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2). *Bul. of the Atmos. Met. Soc.* 2002, 83: 1631—1643.
17. *McPhaden M.J.* El Niño and La Niña: Causes and Global Consequences. In: *Encyclopedia of Global Environmental Change.* Vol. 1. Chichester, UK: John Wiley and Sons, LTD, 2002: 353—370.
18. *Serykh I.V.* On the influence of El Niño — Global Atmospheric Oscillation on the interannual variability of hydrometeorological parameters. *Gidrometeorologiya i Ekologiya.* Hydrometeorology and Ecology. 2021, 63: 329—370. doi: 10.33933/2074-2762-2021-63-329-370. [In Russian].
19. *Tian F., Zhang R.-H., Wang X.* Factors affecting interdecadal variability of air—sea CO₂ Fluxes in the tropical Pacific, revealed by an ocean physical—biogeochemical model. *Climate Dynamics.* 2019. doi: 10.1007/s00382-019-04766-5.
20. *Bordbar M.H., Martin T., Latif M., Park W.* Role of internal variability in recent decadal to multidecadal tropical Pacific climate changes. *Geophys. Res. Lett.* 2017, 44: 4246—4255. doi: org/10.1002/2016GL072355.
21. *England M.H., McGregor S., Spence P. et al.* Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus. *Nat. Clim. Chang.* 2014, 4: 222—227. doi: 10.1038/NCLIMATE2106.
22. *Wang X., Murtugudde R., Hackert E., Wang J., Beauchamp J.* Seasonal to decadal variations of sea surface pCO₂ and sea-air CO₂ flux in the equatorial oceans over 1984—2013: A basin-scale comparison of the Pacific and Atlantic Oceans. *Global Biogeochem. Cycles.* 2015, 29(5): 597—609. doi: 10.1002/2014GB005031.
23. *Ishii M., Feely R.A., Rodgers K.B. et al.* Air-sea CO₂ flux in the Pacific Ocean for the period 1990—2009. *Biogeosciences.* 2014, 11: 709—734. doi: 10.5194/bg-11-709-2014.

24. Wanninkhof R., Park G.H., Takahashi T. et al. Global ocean carbon uptake: magnitude, variability and trends. *Biogeosciences*. 2013, 10: 1983—2000. doi: 10.5194/bg-10-1983-2013.
25. Feely R.A., Takahashi T., Wanninkhof R. et al. Decadal variability of the air–sea CO₂ fluxes in the equatorial Pacific Ocean. *J. Geophys. Res.* 2006, 111: C08S90. doi: 10.1029/2005j c003129.
26. McKinley G.A., Fay A.R., Lovenduski N.S., Pilcher D.J. Natural variability and anthropogenic trends in the ocean carbon sink. *Ann. Rev. Mar. Sci.* 2017, 9: 125—150. doi: 10.1146/annur ev-marine-01081 6-06052 9.
27. Valsala V., Roxy M., Ashok K., Murtugudde R. Spatiotemporal characteristics of seasonal to multidecadal variability of pCO₂ and air–sea CO₂ fluxes in the equatorial Pacific Ocean. *J. Geophys. Res. Ocean.* 2014, 119: 8987—9012. doi: 10.1002/2014J C0102 12. Received.
28. Malinin V.N., Vainovsky P.A. Moisture exchange between the ocean and the atmosphere in the intertropical convergence zone. *Gidrometeorologiya i Ekologiya. Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2021, 63: 255—278. doi: 10.33933/2713-3001-2021-63-255-278. [In Russian].
29. Benson N.U., Osibanjo O.O., Asuquo F.E., Anake W.U. Observed trends of pCO₂ and air–sea CO₂ fluxes in the North Atlantic Ocean. *International Journal of Marine Science*. 2014, 4(72): 1—7. doi: 10.5376/ijms.2014.04.0072.
30. Breeden M.L., McKinley G.A. Climate impacts on multidecadal pCO₂ variability in the North Atlantic: 1948—2009 // *Biogeosciences*. 2016, 13: 3387—3396.
31. De Vries T., Le Quéré, Andrews C., Berthet O., Hauck S., Ilyina J., Landschützer T., Lenton P., Lima A., Nowicki I.D., Schwinger M., Séférian J. Decadal trends in the ocean carbon sink. *P. Nat. Acad. Sci. USA*. 2019, 116: 11646—11651. doi: 10.1073/pnas.1900371116.
32. Malinin V.N., Vainovsky P.A. Variability of the exchange of dioxide the and ocean and atmosphere in the North Atlantic. *Obshchestvo. Sreda. Razvitiye. Society. Environment. Development*. 2021, 3: 103—112. [In Russian].
33. Fedorov A.M., Bashmachnikov I.L., Belonenko T.V. Localization of areas of deep convection in the Nordic seas, the Labrador Sea and the Irminger Sea. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle. Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*. 2018, 63(3): 345—362. doi: 10.21638/spbu07.2018.306. [In Russian].
34. Li F., Lozier M.S. On the linkage between Labrador Sea Water volume and overturning circulation in the Labrador Sea: a case study on proxies, *J. Climate*. 2018, 31: 5225—5241. doi: 10.1175/JC-LI-D-17-0692.1.
35. Rodríguez-Fonseca B., Suárez-Moreno R., Ayarzagüena B., López-Parages J., Gómara I., Villamayor J., Mohino E., Losada T., Castaño-Tierno A. A review of ENSO influence on the North Atlantic. A non-stationary signal. *Atmosphere*. 2016, 7 (7): 87.
36. Broennimann S. Impact of El Niño–Southern Oscillation on European climate. *Rev. Geophys.* 2007, 45: RG3003.
37. Manabe S. Role of greenhouse gas in climate change. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2019, 71: 1, 1620078. doi: 10.1080/16000870.2019.1620078.
38. Loginov V.F., Lysenko S.A. *Sovremennyye izmeneniia global'nogo i regional'nogo klimata. Modern changes in the global and regional climate*. Minsk: Belarusian Science, 2019: 318 p. [In Russian].
39. Smirnov B.M. *Fizika global'noi atmosfery. Parnikovyi effekt, atmosfernoie elektrichestvo, evoliutsiia klimata. Physics of the global atmosphere. Greenhouse effect, atmospheric electricity, climate evolution*. Moscow: ID Intellect, 2017: 400 p. [In Russian].
40. Malinin V.N., Gordeeva S.M., Naumov L.M. Total precipitable water of the atmosphere as a climate forcing factor. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. Current problems in remote sensing of the earth from space*. 2018, 15(3): 243—251. doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-243-251. [In Russian].
41. Malinin V.N. Global ecological crisis and climate. *Uchenyye zapiski RGGMU. Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*. 2017, 48: 11—32. [In Russian].

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 20.12.2021

Принята в печать 20.02.2022

Сведения об авторах

Малинин Валерий Николаевич, д-р геогр. наук, профессор, профессор кафедры прикладной океанографии ЮНЕСКО—МОК и комплексного управления прибрежными зонами Института гидрологии и океанологии Российского государственного гидрометеорологического университета, malinin@rshu.ru.

Вайновский Павел Антонович, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, ООО «Прогноз», pv974@yandex.ru.

Information about authors

Malinin Valery Nikolaevich, Grand PhD (Geogr. Sci.), Professor, Russian State Hydrometeorological University, Institute of Hydrology and Oceanology, UNESCO—IOC Department of Applied Oceanography and Integrated Coastal Zone Management, Professor.

Vainovskii Pavel Antonovich, PhD (Geogr. Sci.), senior researcher, LLC «Prognoz».