

Потоки парниковых газов в приморских водно-болотных экосистемах тропиков и субтропиков: обзор

© 2026. Г. Д. Ватутин, аспирант, м. н. с.,

Е. А. Филимоненко, к. г.-м. н., в. н. с.,

Автономная некоммерческая образовательная организация
высшего образования «Научно-технологический университет Сириус»

354340, Россия, федеральная территория «Сириус»,

Олимпийский проспект, д. 1,

e-mail: georgyvaturin@yandex.ru

Водно-болотные угодья играют важнейшую роль в глобальном углеродном цикле. Генерализация данных о потоках климатически активных газов – метана (CH_4), оксида азота (I) (N_2O) и углекислого газа (CO_2) из приморских водно-болотных угодий субтропической и тропической зоны выявила, что они являются их источниками со средними величинами эмиссии $187 \pm 19 \text{ мг CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$; $7,6 \pm 1,0 \text{ мг CH}_4/\text{м}^2/\text{ч}$; $0,13 \pm 0,05 \text{ мг N}_2\text{O}/\text{м}^2/\text{ч}$. Скорость эмиссии парниковых газов снижается с ростом солёности морских вод и смещением pH почв в области кислых или щелочных величин. В субтропических приморских водно-болотных угодьях снижение температуры почв и содержания в них органического вещества в зимний период уменьшают скорости эмиссии углекислого газа и метана. В тропической зоне высокая интенсивность эмиссии углекислого газа и оксида азота (I) наблюдается в засушливый период, а скорость эмиссии метана повышается в сезон дождей. Эмиссия углекислого газа и метана из прибрежных водно-болотных угодий, расположенных в тропическом муссонном типе климата, значительно выше в сравнении с аналогичными значениями для приморских водно-болотных экосистем, локализованных в постоянно влажном и сезонно-влажном типах климата. Среди приморских водно-болотных экосистем тропиков и субтропиков наибольшей скоростью эмиссии климатически активных газов характеризуются пресноводные марши и прибрежные болота.

Ключевые слова: климатически активные газы, водно-болотные угодья, тропики, субтропики.

Greenhouse gases fluxes from (sub)tropical blue carbon ecosystems: a review

© 2026. G. D. Vatutin ORCID: 0009-0004-7043-0054

E. A. Filimonenko ORCID: 0000-0002-8146-4514

Sirius University of Science and Technology,

1, Olympic Ave., Sirius Federal Territory, Russia, 354340,

e-mail: georgyvaturin@yandex.ru

Blue carbon ecosystems are crucial for global carbon cycle. Fluxes of methane (CH_4), nitrous oxide (N_2O), and carbon dioxide (CO_2) from subtropical and tropical coastal wetlands revealed that these ecosystems act as net sources, with mean emission rates of $187 \pm 19 \text{ мг CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$, $7,6 \pm 1,0 \text{ мг CH}_4/\text{м}^2/\text{ч}$, and $0,13 \pm 0,05 \text{ мг N}_2\text{O}/\text{м}^2/\text{ч}$. Greenhouse gas emission rates decrease with increasing water salinity and soil pH shifts towards acidic or alkaline values. In subtropical coastal wetlands, lower both soil temperatures and organic matter content during the winter decrease emission rates of carbon dioxide and methane. In subtropical coastal wetlands lower both soil temperatures and organic matter content during the winter decrease emission rates of carbon dioxide and methane. In the tropical zone, high emission of carbon dioxide and nitrous oxide are observed during the dry season, whereas methane emissions peak during the wet season. Coastal wetlands located in tropical monsoon climates exhibit significantly higher carbon dioxide and methane emissions compared to those in tropical rainforest (constantly humid) and tropical savanna (seasonally humid) climate types. Among coastal wetland ecosystems in the tropics and subtropics, freshwater marshes and coastal swamps are characterized by the highest emission rates of climatically active gases.

Keywords: climate-active gases, coastal wetlands, tropics, subtropics.

Водно-болотные угодья играют критически важную роль в глобальных циклах углерода (C) и азота (N). Несмотря на то, что они занимают 5–8 % суши, данные экосистемы регулируют 68 % запасов C в почвах [1]. Основными типами водно-болотных угодий являются мангровые леса (14,5 млн га), марши (2,2 млн га), устья рек, прибрежные заболоченные земли и морские луга с коралловыми рифами (38,8 млн га).

Приморские водно-болотные экосистемы обладают высокой поглотительной способностью в отношении углерода и являются одними из наиболее эффективных его природных долгосрочных репозиторий. Поскольку прибрежные почвы в основном находятся под водой, то органическое вещество в них медленнее разлагается и не подвержено потерям в результате периодических пожаров, в отличие от наземных экосистем. Это способствует устойчивому накоплению и долгосрочному удержанию C в почвах приморских водно-болотных экосистем [2]. Прибрежные водно-болотные экосистемы являются репозиторием для 11,5 млрд т C, из которых 6,5 млрд т накоплено в мангровых экосистемах [3].

Скорость накопления C в прибрежных водно-болотных экосистемах составляет 138–226 г C/м² в год, что в 30–50 раз выше, чем в лесных экосистемах (4–5 г C/м² в год) [4, 5]. Среди всех типов приморских водно-болотных экосистем наибольшая скорость накопления C характерна для маршей – 242 ± 26 г C/м² в год, в мангровых лесах она составляет 168 ± 36 г C/м² в год, а в экосистемах морских лугов – 83 г C/м² в год [4]. Мангровые леса хранят 52 т N/га, из которых 96 % запасено на глубине до 1 м, что в 2,5 раза превышает запасы N в наземных экосистемах в сопоставимых климатических условиях [6].

Несмотря на высокую значимость водно-болотных угодий для глобального цикла C и N [1, 5], их площади сокращаются из-за чрезмерной эксплуатации их водных и биологических ресурсов [7]. Темпы ежегодного сокращения площадей водно-болотных угодий составляют 0,7–3,0 % для мангровых лесов, 1–2 % для маршей, 7 % для морских лугов [5]. Тропические водно-болотные угодья более уязвимы к антропогенному воздействию, чем водно-болотные экосистемы умеренной и бореальной зоны. Это обусловлено высокой антропогенной нагрузкой в тропиках и субтропиках из-за чрезмерной эксплуатации водных и биологических ресурсов ввиду большей экономической рентабельности по сравне-

нию с аналогичными экосистемами в других климатических зонах [7]. Ежегодно из деградировавших приморских водно-болотных экосистем выделяется до 1 млрд т CO₂, что составляет 20 % от глобальных выбросов в результате сведения лесов [8]. Потоки климатически активных газов (оксида углерода(IV) – CO₂, метана – CH₄, оксида азота(I) – N₂O) из водно-болотных угодий формируются в результате процессов молекулярной диффузии, пузырьковой эмиссии, а также в результате перемещения газов (метана) из донных отложений в атмосферу внутри тканей растений [9]. Однако газообмен в прибрежных водно-болотных угодьях субтропической и тропической зон изучен меньше, чем в аналогичных экосистемах умеренной зоны [10, 11]. Одним из основных научных вопросов в контексте климатических изменений является дискуссия о роли прибрежных водно-болотных экосистем тропиков и субтропиков в глобальном потеплении – являются ли они источником или стоком климатически активных газов.

Целью данного обзора является генерализация имеющихся данных о величинах потоков климатически активных газов (CH₄, N₂O, CO₂) из приморских водно-болотных угодий субтропиков и тропиков в зависимости от физико-химических свойств почв и вод, экосистемных и климатических параметров.

Методы исследования

Сбор данных о потоках парниковых газов в водно-болотных экосистемах тропиков и субтропиков. База данных включала информацию о потоках парниковых газов (CO₂, CH₄, N₂O; мг/м²/ч), типе климата по Кёппену, координатах локаций исследований, типе экосистемы, среднегодовом количестве осадков, среднегодовой температуре воздуха. Дополнительными критериями, включёнными в базу данных, являлись pH, температура, плотность и влажность почв; содержание органического C и общего N в почвах; солёность и температура морских вод; температура атмосферного воздуха в момент измерений; глубина залегания подземных вод; доминирующий тип растительности в пределах территории исследования. Обзор величин потоков парниковых газов в приморских водно-болотных экосистемах тропиков и субтропиков выполнен на основе генерализации опубликованных научных данных в рецензируемых изданиях. Для поиска данных были использованы базы научных онлайн-библиотек Wiley ([7](https://on-</p>
</div>
<div data-bbox=)

linelibrary.wiley.com/), ScienceDirect (<https://www.sciencedirect.com/>), Springer Link (<https://link.springer.com/>), MDPI (<https://www.mdpi.com/>), Nature (<https://www.nature.com/>), Semantic Scholar (<https://www.semanticscholar.org/>), ResearchGate (<https://www.researchgate.net/>), JSTOR (<https://www.jstor.org/>), Copernicus (<https://bg.copernicus.org/>), Frontiers (<https://www.frontiersin.org/>), Taylor & Francis online (<https://www.tandfonline.com/>), Inter-Research Science Publisher (<https://www.int-res.com/>). Формула поиска публикаций включала ключевые словосочетания: coastal wetland OR methane flux, tropical coastal wetland OR methane flux, carbon dioxide flux AND coastal ecosystems, carbon dioxide flux AND tropical coastal ecosystems, methane flux AND coastal ecosystems, methane flux AND tropical coastal ecosystems, nitrous oxide AND coastal ecosystems, nitrous oxide AND tropical coastal ecosystems. В результате поиска количество найденных значений (n) потоков CO₂, CH₄ и N₂O составило 583, 483 и 156 соответственно. Сформированная база данных охватывает все субтропические и тропические регионы мира (Юго-Восточная Азия, Палау и Папуа-Новая Гвинея; Австралия и Новая Каледония; Восточная Азия; юго-восточные штаты США; Карибский бассейн; Бразилия; Африка: Танзания, Кения, Кот'д-Ивуар и остров Реюньон) (рис. 1).

Наиболее часто встречающиеся типы прибрежных водно-болотных экосистем для каждого региона, включённого в настоящий обзор, представлены в таблице.

Обработка результатов. Обработка численных значений потоков климатически активных газов, включённых в базу данных, проводилась в программном обеспечении MS Excel. Группировка собранных данных была выполнена по ряду критериев: регион исследования, тип прибрежной водно-болотной экосистемы, тип климата по Кёппену, сезон проведения замеров потоков газов, pH почв, солёность прибрежных вод. Для оценки средних величин потоков парниковых газов в приморских водно-болотных экосистемах тропиков и субтропиков были подсчитаны и учтены: их средние арифметические и медианные значения, стандартное отклонение и стандартная ошибка среднего. Для измерения статистической значимости различий между группами использовался критерий Тьюки (средневзвешенное среднее значение) однофакторного дисперсионного анализа (One-Way ANOVA) при доверительном интервале в 95% ($p < 0,05$).

Результаты и обсуждение

Генерализация данных о потоках климатически активных газов в приморских водно-болотных экосистемах тропиков и субтропиков показала, что потоки углекислого газа из почв изменяются в диапазоне от -1758 до 3555 мг CO₂/м²/ч; метана – от -28,5 мг CH₄/м²/ч до 245 мг CH₄/м²/ч; оксида азота(I) – от -2,74 мг N₂O/м²/ч до 7,18 мг N₂O/м²/ч. Водно-болотные угодья тропиков и субтропиков являются эмитентом углекислого газа в 80 %

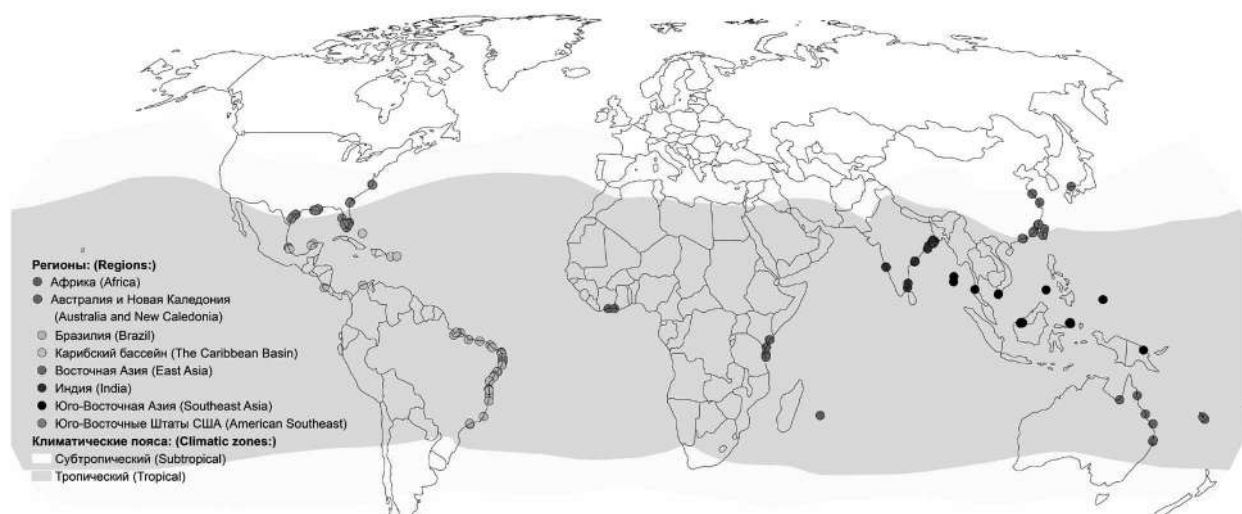


Рис. 1. Карта расположения приморских водно-болотных экосистем тропиков и субтропиков, включённых в базу данных для оценки потоков углекислого газа, метана и оксида азота(I)

Fig. 1. Map of the blue carbon ecosystems in the tropics and subtropics included in the database for assessing carbon dioxide, methane, and nitrous oxide fluxes

Таблица / Table

Частотные характеристики данных потоков углекислого газа, метана и оксида азота (I)
для разных типов приморских водно-болотных угодий субтропической и тропической зоны
Frequency distribution of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide
fluxes across blue carbon ecosystems in subtropics and tropics

Регион мира / Region	Типы прибрежных водно-болотных экосистем Types of coastal ecosystems
Страны Юго-Восточной Азии Southeast Asia	мангровые леса / mangrove forests (n = 58), устья рек / river estuaries (n = 36), мангровые ручьи / mangrove creeks (n = 16)
Австралия и Новая Каледония Australia and New Caledonia	мангровые леса / mangrove forests (n = 45), коралловые рифы / coral reefs (n = 45), мангровые ручьи / mangrove creeks (n = 24)
Восточная Азия East Asia	солоноватые марши / brackish marshes (n = 75), мангровые леса / mangrove forests (n = 65), устья рек / river estuaries (n = 25)
Индия India	мангровые леса / mangrove forests (n = 86), мангровые ручьи / mangrove creeks (n = 78)
Юго-восточные штаты США American Southeast	устья рек / river estuaries (n = 91), болота и заболоченные леса / swamps and swamp forests (n = 78), пресноводные (n = 51) и солоноватые марши / freshwater and brackish marshes (n = 41)
Страны Карибского бассейна The Caribbean Basin countries	пресноводные марши / freshwater marshes (n = 36), мангровые леса / mangrove forests (n = 25), болота и заболоченные леса / swamps and swamp forests (n = 23)
Африка и Реюньон Africa and Réunion	мангровые ручьи / mangrove creeks (n = 42), устья рек / river estuaries (n = 30), прибрежные тропические леса / tropical flooded forests (n = 27)
Бразилия Brazil	мангровые ручьи / mangrove creeks (n = 68), коралловые рифы / coral reefs (n = 33), прибрежные тропические леса / tropical flooded forests (n = 15)

Примечание: n – количество значений потоков климатически активных газов (CO_2 , CH_4 , N_2O), включённых в базу данных.

Note: n is a quantity of greenhouse gases (CO_2 , CH_4 , N_2O) fluxes values, included in a database.

случаев, метана – в 90 %, оксида азота(I) – в 87 %. Средняя интенсивность потоков углекислого газа составляет $186,5 \pm 18,7$ мг CO_2 /м²/ч; метана – $7,64 \pm 1,03$ мг CH_4 /м²/ч; оксида азота(I) – $0,13 \pm 0,05$ мг N_2O /м²/ч.

Экосистемы пресноводных маршей характеризуются самой высокой скоростью эмиссии углекислого газа и метана среди всех рассматриваемых экосистем в зоне тропиков и субтропиков (рис. 2).

Потоки углекислого газа из мангровых лесов, мангровых ручьёв и устьев рек в 2–6 раза ниже по сравнению с маршевыми и прибрежно-лесными экосистемами, что свидетельствует о более эффективном накоплении и стабилизации углерода в манграх. В коралловых рифах наблюдается депонирование углекислого газа, а также низкие скорости эмиссии метана и оксида азота(I) в сравнении с другими приморскими водно-болотными экосистемами (рис. 2). В сезонно затапливаемых прибрежных тропических водно-болотных угодьях, к которым относятся

пресноводные и солоноватые марши, происходит более интенсивная эмиссия метана (рис. 2), чем в постоянно затопленных водно-болотных экосистемах [12]. В заболоченных и мангровых лесах эмиссия CH_4 в 1,9–3,7 раза ниже, чем в маршах, а приливные тропические леса являются стоком метана. Экосистемы прибрежных болот и заболоченных лесов формируют поток оксида азота(I) в $0,46 \pm 0,45$ мг N_2O /м²/ч (рис. 2). Это значение является наивысшим среди всех прибрежных водно-болотных экосистем. Пресноводные марши, мангровые и приливные тропические леса характеризуются меньшей скоростью эмиссии N_2O в сравнении с прибрежными болотистыми экосистемами. Небольшая интенсивность эмиссии оксида азота(I) относительно других приморских водно-болотных экосистем характерна для солоноватых маршей, устьев рек и коралловых рифов.

Приморские водно-болотные угодья, расположенные в регионе Карибского бассейна и в юго-восточных штатах США, представлен-

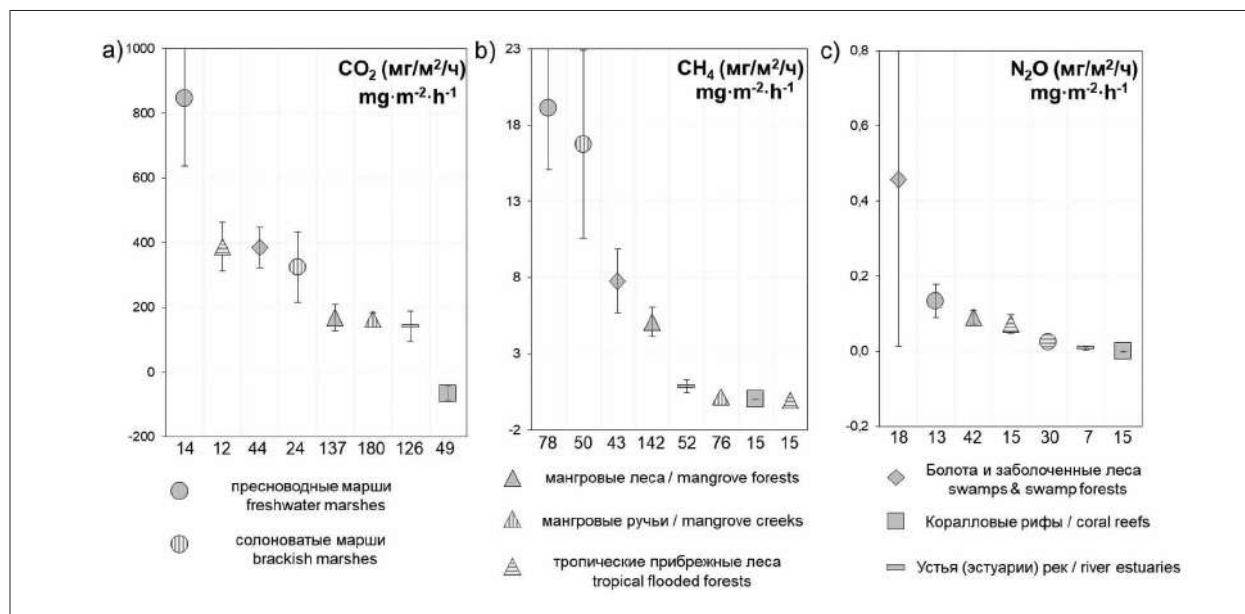


Рис. 2. Потоки углекислого газа (а), метана (b) и оксида азота(I) (c) в зависимости от типа приморских водно-болотных экосистем тропиков и субтропиков. Здесь и далее на рисунках: цифрами на горизонтальной оси обозначено количество значений, учтённых для расчёта среднего; планками погрешностей изображены стандартные ошибки среднего
Fig. 2. Fluxes of (a) carbon dioxide, (b) methane, and (c) nitrous oxide across coastal wetland ecosystems in the tropics and subtropics. Here and further in the figures: numbers on the horizontal axis indicate the sample size used to calculate the mean; error bars represent the standard error of the mean

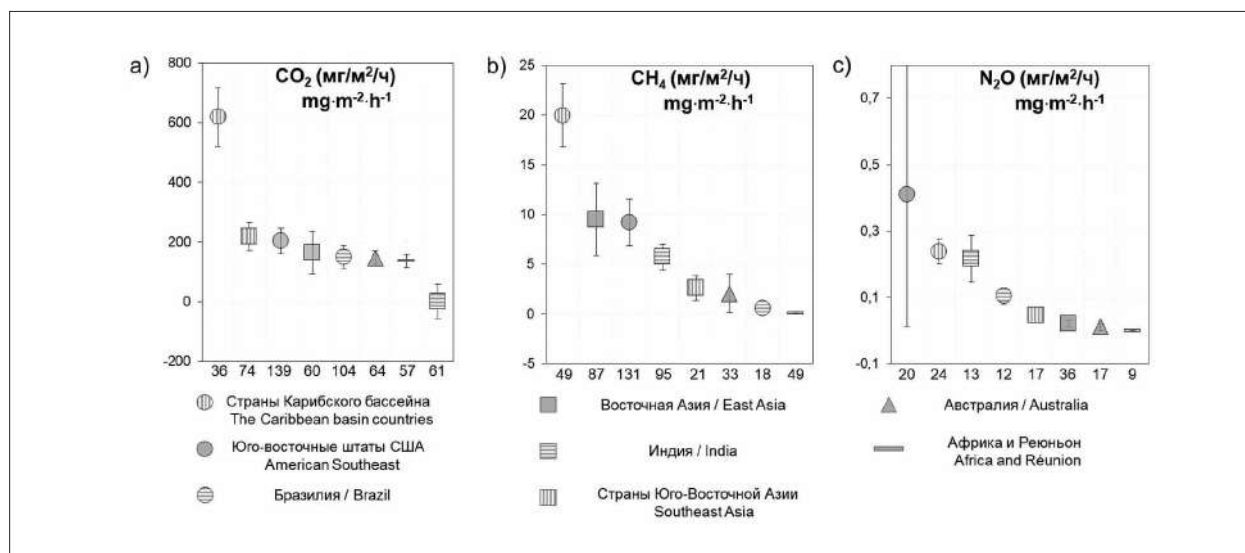


Рис. 3. Потоки углекислого газа (а), метана (b) и оксида азота(I) (c) в зависимости от региона локализации тропических и субтропических водно-болотных экосистем
Fig. 3. Fluxes of (a) carbon dioxide, (b) methane and (c) nitrous oxide by region of tropical and subtropical wetland ecosystems

ные в основном пресноводными маршами, мангровыми лесами и заболоченными зонами, характеризуются высокими значениями интенсивности эмиссии парниковых газов относительно экосистем, расположенных в других тропических и субтропических регионах мира. Для прибрежных водно-болотных экосистем, расположенных в Африке, характерны низкие скорости эмиссии парниковых газов в сравне-

нии с экосистемами других субтропических и тропических регионов (рис. 3).

В прибрежных водно-болотных экосистемах, расположенных в юго-восточных штатах США зафиксирован высокий разброс индивидуальных значений потоков оксида азота(I) из прибрежных почв (от -2,74 до 7,18 мг N₂O/м²/ч). В среднем приморские водно-болотные угодья в этом регионе эми-

тируют оксид азота (I) со скоростью в $0,41 \pm 0,40$ мг N_2O /м²/ч. Этот показатель на 70–90 % превышает аналогичные значения для экосистем Карибского и Индийского регионов. Для прибрежных водно-болотных угодий Бразильского региона средний показатель интенсивности эмиссии оксида азота (I) в 2–4 раза ниже, чем в приморских экосистемах юго-востока США, в Индии и в Карибском регионе. При этом скорость эмиссии N_2O для приморских водно-болотных экосистем Бразилии в 2–10 раз выше, чем в прибрежных водно-болотных экосистемах Юго-Восточной Азии, Восточной Азии и Австралии. Приморские водно-болотные экосистемы, расположенные в Африканском регионе, являются стоком оксида азота (I).

Установлена сезонная изменчивость скорости эмиссии парниковых газов, а также её зависимость от типа климата в прибрежных водно-болотных экосистемах. Кроме этого, на интенсивность эмиссии климатически активных газов из приморских водно-болотных экосистем тропиков и субтропиков влияют солёность прибрежных вод и pH почв.

Влияние физико-химических свойств воды на потоки парниковых газов из приморских водно-болотных экосистем тропиков и субтропиков.

Генерализация глобальных данных о потоках углекислого газа, метана и закиси азота в приморских водно-болотных экосистемах субтропической и тропической зоны в зависимости от солёности вод была произведена на основе Венецианской классификации [13]. Наиболее интенсивная эмиссия угле-

кислого газа, метана и оксида азота (I) (рис. 4) происходит из пресноводных приморских водно-болотных экосистем – 342 ± 53 мг CO_2 /м²/ч; $13,7 \pm 2,7$ мг CH_4 /м²/ч; $0,13 \pm 0,04$ мг N_2O /м²/ч).

В годовом цикле показатель солёности прибрежных вод достигает максимума в сухой сезон в тропической зоне, и в летний период – в субтропиках. Это связано с повышенной испаряемостью прибрежных вод и меньшим относительно испаряемости воды количеством осадков. Общим следствием повышения солёности прибрежных вод является снижение интенсивности эмиссии CO_2 , CH_4 и N_2O . Это обусловлено снижением скорости микробного метаболизма из-за возрастания энергетических затрат микроорганизмов на адаптацию к среде с высоким содержанием солей в воде [14, 15]. Кроме этого, в условиях высокой солёности вод углекислый газ, выделяющийся в результате микробной деятельности, растворяется и интенсивнее осаждается в виде карбоната кальция ($CaCO_3$), чем в пресноводных условиях [16], что уменьшает итоговую эмиссию CO_2 из водно-болотных экосистем с повышенной солёностью вод.

С увеличением солёности прибрежных вод, количество сульфатредуцирующих бактерий, основных ингибиторов метаногенеза, повышается за счёт вытеснения метаногенов сульфатвосстанавливающими бактериями [17]. Это приводит к снижению интенсивности выделения CH_4 в прибрежных водах с высокой солёностью (рис. 4).

Снижение потоков оксида азота (I) из водно-болотных экосистем тропиков и суб-

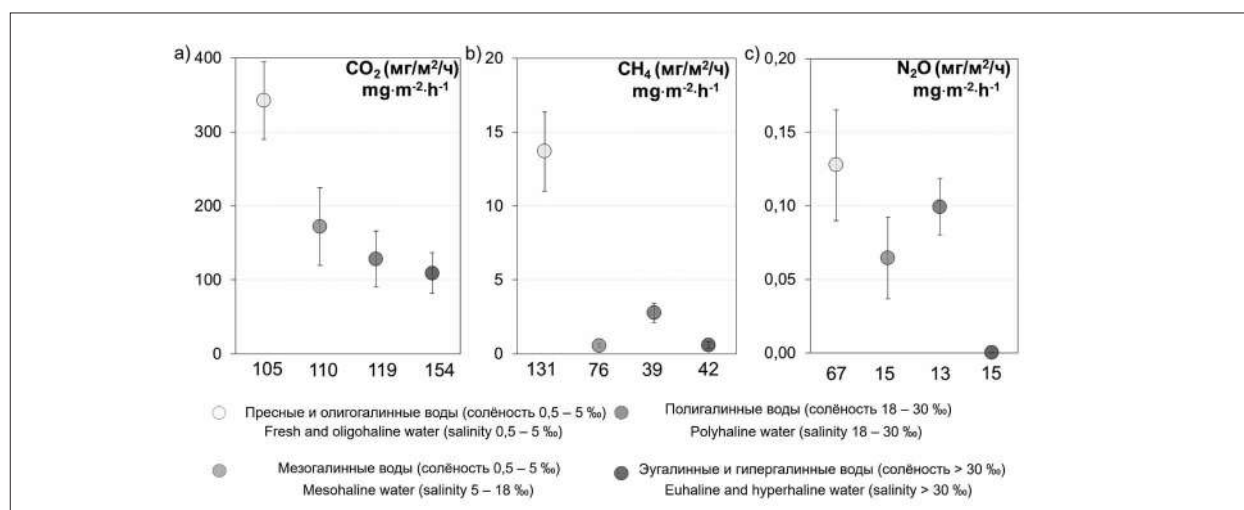


Рис. 4. Потоки углекислого газа (а), метана (b) и оксида азота (I) (с) в приморских водно-болотных экосистемах тропиков и субтропиков в зависимости от их солёности

Fig. 4. Fluxes of (a) carbon dioxide, (b) methane, and (c) nitrous oxide in tropical and subtropical coastal wetlands depending on water salinity

тропиков при повышении солёности прибрежных вод (рис. 4) связано с подавлением активности нитрифицирующих и денитрифицирующих бактерий [18, 19]. В дождливый сезон в тропической зоне, и в зимний период – в субтропиках, солёность прибрежных вод достигает минимальных значений в годовом цикле этого показателя. В течение этих периодов испарение воды в результате воздействия солнечных лучей максимально снижается, в то время как количество осадков либо повышается (как в тропиках), либо остаётся на таком же уровне, как и в летний период (для субтропиков). Обратный процесс – снижение солёности прибрежных вод – будет приводить к росту эмиссии климатически активных газов из тропических и субтропических водно-болотных экосистем.

Для генерализации глобальных данных об интенсивности потоков климатически активных газов в приморских водно-болотных экосистемах субтропиков и тропиков в зависимости от pH почв, данные были сгруппированы в соответствии со шкалой pH NRCS USDA [20] следующим образом: pH от 4 до 6,4 (кислые почвы), pH от 6,6 до 7,3 (нейтральные почвы), pH от 7,3 до 8,5 (щелочные почвы).

Приморские водно-болотные угодья с нейтральным pH почв характеризуются более интенсивными потоками метана и оксида азота(I) (рис. 5) в атмосферу по сравнению с кислыми и щелочными почвами.

В кислых почвах происходит деактивация ферментов, участвующих в метаногенезе (ацетаткиназы, формилметанофурандегидрогеназы, тетрагидрометанооптерин-S-метилтрансферазы), а также накопление

летучих жирных кислот, которые ингибируют процесс метаногенеза [21]. При наличии большого количества живой и мёртвой наземной биомассы и при оптимальных для анаэробного разложения органического вещества условиях (прилив) интенсивность эмиссии метана из приливно-отливных прибрежных водно-болотных угодий может резко возрасти до 91–245 мг $\text{CH}_4/\text{м}^2/\text{ч}$ даже в слабокислой (pH 6,2) почве [22]. С повышением pH почв токсичность аммиака для метаногенных бактерий возрастает [23], хотя известны метаногенные микроорганизмы, способные к адаптации при высоких показателях pH почв [24].

Снижение скорости эмиссии оксида азота(I) из кислых почв приморских водно-болотных угодий связано с замедлением скорости нитрификации и, одновременно с этим, ингибированием активности фермента N_2O -редуктазы, который отвечает за финальный этап бактериальной денитрификации в почвах [25, 26]. Ингибиторы нитрификации (ацетилен) на 77 % эффективнее снижают эмиссию оксида азота(I) в щелочных почвах, в сравнении с кислыми и нейтральными почвами, в которых снижение составляет 55 и 51 %, соответственно [27]. В щелочных почвах снижается доступность субстрата для денитрификации, а также подавляется активность генов-денитрификаторов *nirK*, *nirS* и *nosZ*, что приводит к снижению интенсивности этого процесса [28].

При смещении pH в область щелочных значений скорость эмиссии углекислого газа из приморских водно-болотных экосистем тропиков и субтропиков уменьшается (рис. 5).

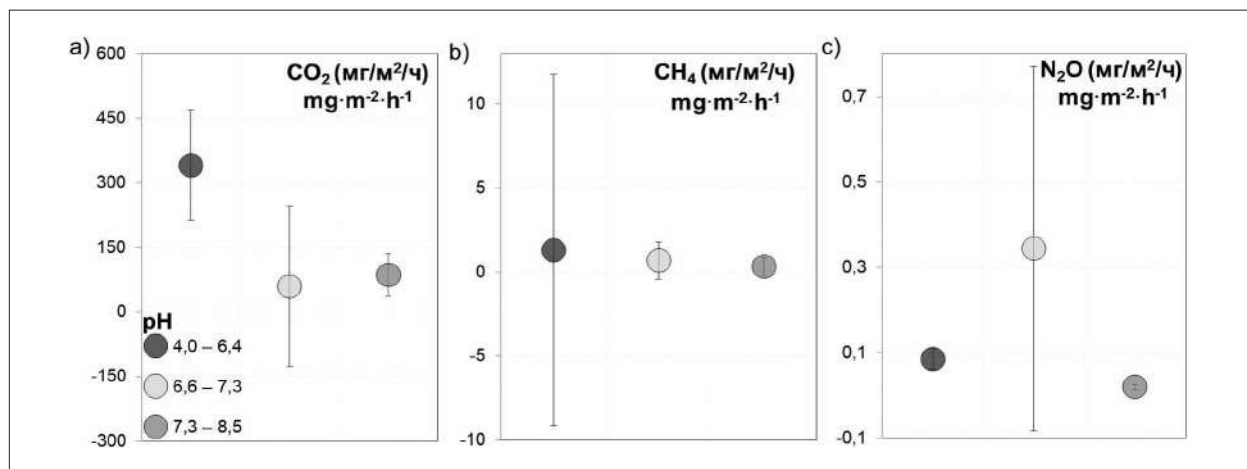


Рис. 5. Потоки углекислого газа (а), метана (б) и оксида азота(I) (с) в приморских водно-болотных экосистемах тропиков и субтропиков в зависимости от pH почвы
Fig. 5. Fluxes of (a) carbon dioxide, (b) methane, and (c) nitrous oxide in tropical and subtropical coastal wetlands depending on soil pH

При более низких значениях pH почв парциальное давление CO_2 в почвах резко возрастает, что потенциально приводит к большему поступлению CO_2 из почв в атмосферу [29]. Под влиянием приливов в литоральной зоне происходит обмен веществами между почвой и водой, в результате чего в почву поступают катионы (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), снижающие кислотность почв, и интенсивность эмиссии углекислого газа снижается. В щелочных почвах приморских водно-болотных угодий усиливается поглощение CO_2 при образовании гидрокарбоната кальция в результате реакции между карбонатом и CO_2 [30, 31], что приводит к снижению потоков углекислого газа.

Влияние времени года на потоки парниковых газов из приморских водно-болотных экосистем тропиков и субтропиков. В почвах субтропических водно-болотных угодий температурные колебания являются значимым фактором интенсивности почвенного дыхания [32, 33]. Для субтропических экосистем характерно четыре периода года: жаркое дождливое лето, переходные периоды (осень, весна) и мягкая зима с малым количеством осадков (кроме мест, где осадки распределены равномерно в течение всего года). Наибольшие потоки углекислого газа и метана наблюдаются в весенний и летний периоды, которые характеризуются высокой температурой ($25,5^\circ\text{C}$ – весна; $30,9^\circ\text{C}$ – лето) и влажностью (35,6; 36,2 %) почв (рис. 6).

В летнее время в водно-болотные экосистемы субтропической зоны поступает больше органических остатков, чем в остальное время года, что усиливает интенсивность

эмиссии климатически активных газов [34]. Совокупный эффект истощения лабильного и легко минерализуемого органического вещества и более низких зимних температур снижает скорость эмиссии углекислого газа и метана в зимний сезон [35].

В тропических приморских водно-болотных экосистемах годовая амплитуда температур почв незначительная – $3\text{--}5^\circ\text{C}$. В тропиках преобладают два сезона: дождливый и сухой. Влажность является наиболее важным фактором сезонной динамики эмиссии парниковых газов из почв в тропических широтах. Во влажный сезон скорость эмиссии CO_2 из тропических приморских водно-болотных угодий на 20 % ниже, чем во время засушливого сезона (рис. 7).

В засушливый период доступность кислорода в почвах повышается, что является благоприятным фактором для аэробного окисления органического вещества в почвах прибрежных водно-болотных экосистем [36, 37]. Следовательно, в сухой сезон в почвах прибрежных водно-болотных угодий тропической зоны наблюдается более интенсивная эмиссия CO_2 в атмосферу, в то время как в дождливый сезон доступность почвенного кислорода снижается из-за высокой влажности почв и заполнения почвенных пор водой. Это приводит к снижению активности процессов аэробного разложения органического вещества и понижению интенсивности эмиссии CO_2 в атмосферу [38].

Потоки метана из прибрежных водно-болотных угодий тропической зоны во время влажного сезона в 4,5 раза ($p < 0,05$) выше, чем во время сухого сезона (рис. 7). Во влаж-

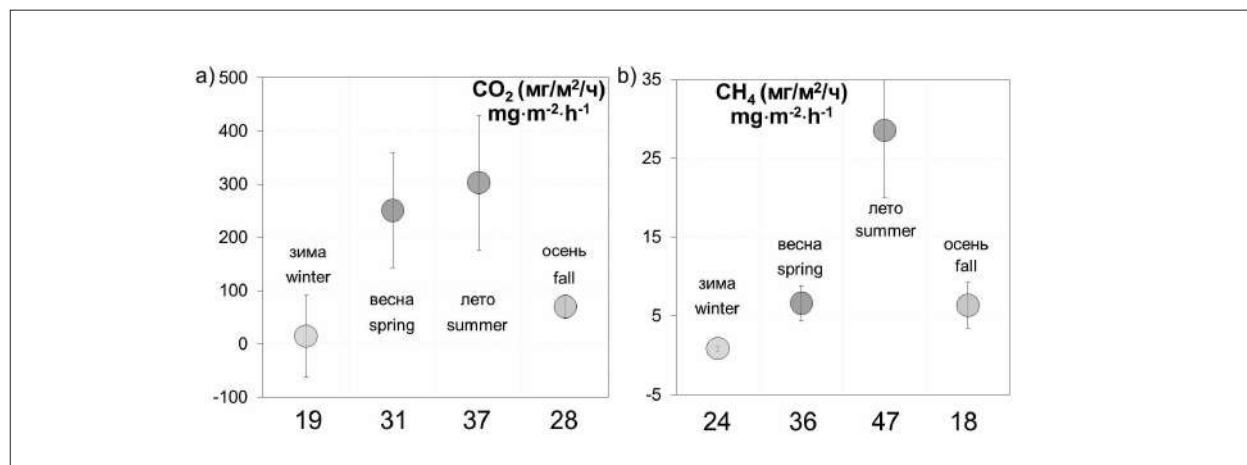


Рис. 6. Потоки углекислого газа (a) и метана (b) в приморских водно-болотных экосистемах субтропиков в зависимости от сезона года / Fig. 6. Fluxes of (a) carbon dioxide and (b) methane in subtropical coastal wetlands depending on season

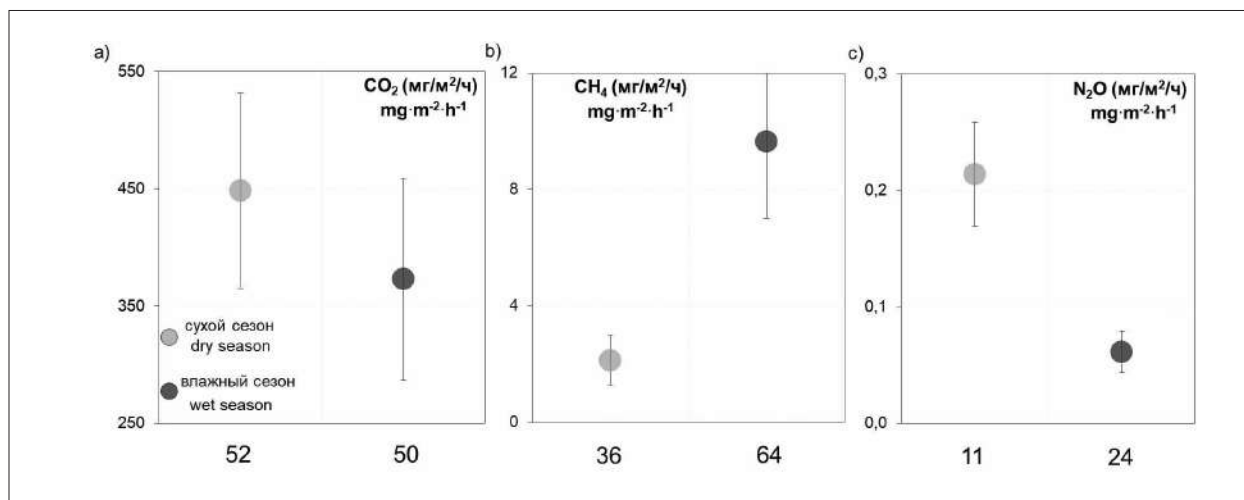


Рис. 7. Потоки углекислого газа (а), метана (б) и оксида азота(I) (с) в приморских водно-болотных экосистемах тропиков в сухой и влажный сезоны
Fig. 7. Fluxes of (a) carbon dioxide, (b) methane, and (c) nitrous oxide in tropical coastal wetlands during the dry and wet seasons

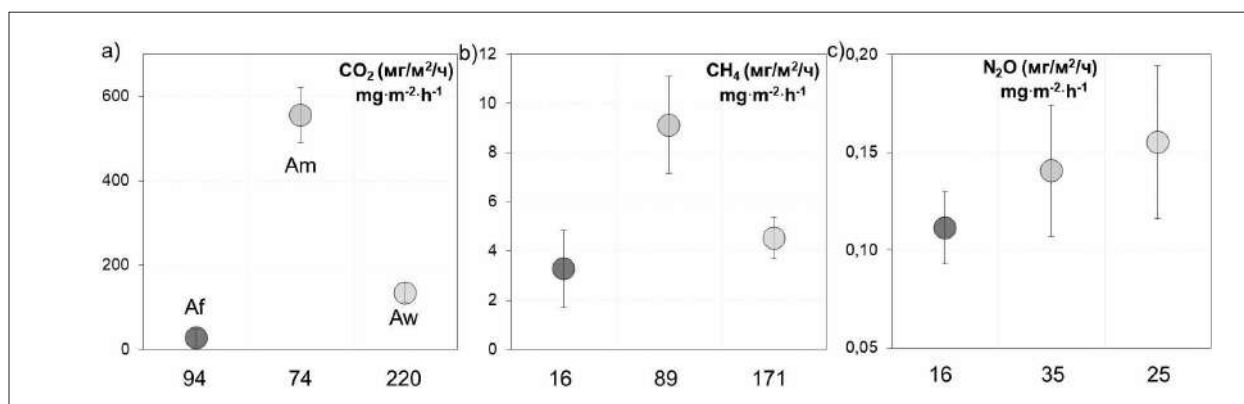


Рис. 8. Потоки углекислого газа (а), метана (б) и оксида азота(I) (с) в приморских водно-болотных экосистемах тропического муссонного (Af), экстремально влажного (Am) и более засушливого (Aw) климата
Fig. 8. Fluxes of (a) carbon dioxide, (b) methane, and (c) nitrous oxide in tropical coastal wetlands under monsoon-influenced (Am), tropical rainforest (Af), and tropical savanna (Aw) climates

ный сезон почвы приморской зоны затопляются, происходит снижение окислительно-восстановительного потенциала (до 100), сочетающееся со снижением солёности вод, и увеличением содержания органического вещества, что способствует усилению метаногенеза [22, 36, 39] и усиливает его эмиссию.

Потоки оксида азота(I) из прибрежных водно-болотных угодий тропической зоны во время влажного сезона в 3,5 раза ниже, чем во время сухого (рис. 7). Во влажных бескислородных условиях при активной денитрификации и анаэробном окислении аммония, из почв активно выделяется молекулярный азот, что снижает интенсивность выбросов оксида азота(I) [34].

Прибрежные водно-болотные экосистемы, расположенные в зоне тропического мус-

сонного климата, характеризуются высокой скоростью эмиссии углекислого газа и метана (рис. 8).

В экстремально влажных (Af) или более засушливых (Aw) условиях скорости эмиссии CO_2 и CH_4 снижены в сравнении с приморскими водно-болотными угодьями в тропическом муссонном климате. С уменьшением количества среднегодовых осадков в тропиках интенсивность эмиссии оксида азота(I) (рис. 8) постепенно возрастает. Для водно-болотных угодий, расположенных в зоне постоянно влажного климата (Af), среднегодовое количество осадков составляет в среднем 2460 мм, средняя скорость эмиссии N_2O на 26 % меньше по сравнению с экосистемами в муссонном климате (Am), среднегодовое количество осадков составляет в среднем 1955 мм).

Закключение

На основании 1222 индивидуальных значений потоков CO_2 , CH_4 , N_2O из приморских водно-болотных угодий в тропиках и субтропиках была выполнена их генерализация для оценки средних величин и установления зависимости от солёности прибрежных вод, водородного показателя почв, сезонности, а также региона исследования и типа экосистем. Скорость эмиссии CO_2 , CH_4 , N_2O из почв приморских водно-болотных угодий субтропиков и тропиков снижается с повышением солёности шельфовых вод. Это связано с осмотическим стрессом для микробного сообщества и ингибированием микробного дыхания почв. Потоки метана и оксида азота (I) из почв приморских водно-болотных угодий субтропиков и тропиков имеют наибольшую скорость при нейтральном pH почв, которая снижается при смещении водородного показателя в области более кислых или щелочных значений. С наступлением влажного сезона в тропических приморских водно-болотных экосистемах эмиссия метана значительно увеличивается в сравнении с сухим сезоном. Интенсивность потоков оксида азота (I) и углекислого газа в прибрежных водно-болотных угодьях субтропиков и тропиков снижается с наступлением дождливого периода. Потоки CO_2 и CH_4 из приморских водно-болотных угодий субтропической и тропической зоны имеют наибольшие величины в пресноводных маршах, а N_2O – в прибрежных заболоченных лесах. Коралловые рифы являются стоком углекислого газа, а приливные тропические леса – поглотителем метана из атмосферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственной программы федеральной территории «Сириус» «Научно-технологическое развитие федеральной территории «Сириус» (Соглашение №18-03 от 10.09.2024).

References

1. Kumar A., Thakur T.K., Yu Z.G. Editorial: Wetland ecosystems as important greenhouse hotspots // Front. Environ. Sci. 2023. V. 10. Article No. 1127269. doi: 10.3389/fenvs.2022.1127269
2. Howard J., Sutton-Grier A., Herr D., Kleypas J., Landis E., Mcleod E., Pidgeon E., Simpson S. Clarifying the role of coastal and marine systems in climate mitigation // Front. Ecol. Environ. 2017. V. 15. No. 1. P. 42–50. doi: 10.1002/fee.1451
3. Choudhary B., Dhar V., Pawase A.S. Blue carbon and the role of mangroves in carbon sequestration: its

mechanisms, estimation, human impacts and conservation strategies for economic incentives // J. Sea Res. 2024. V. 199. No. 9. Article No. 102504. doi: 10.1016/j.seares.2024.102504

4. Dutta J., Zaman S., Mitra A. Blue carbon: a natural prescription to mitigate Global Climate Change // Climate Change and blue carbon: webinar articles on “Blue carbon domain: a potential regulator of Climate Change” under RUSA 2.0. Centre of excellence environment, Climate Change and public health, Utkal University, 2020. P. 74–80.
5. Mcleod E., Chmura G.L., Bouillon S., Salm R., Björk M., Duarte C.M., Loverock C.E., Schlesinger W.H., Silliman B.R. A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO_2 // Front. Ecol. Environ. 2011. V. 9. No. 10. P. 552–560. doi: 10.1890/110004
6. Alongi D.M. Nitrogen cycling and mass balance in the world’s mangrove forests // Nitrogen. 2020. V. 1. No. 2. P. 167–189. doi: 10.3390/nitrogen1020014
7. Bernal B., Mitsch W.J. Carbon sequestration in freshwater wetlands in Costa Rica and Botswana // Biogeochemistry. 2013. V. 115. P. 77–93. doi: 10.1007/s10533-012-9819-8
8. Fennessy S., Beers L. The contribution of blue carbon ecosystems to climate change mitigation. Ramsar Briefing Note 12. 2023 [Internet resource] https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/bn12_blue_carbon_ccmitigation_e.pdf (Accessed: 15.08.2025). doi: 10.13140/RG.2.2.17891.22565
9. Malerba M.E., Friess D.A., Peacock M., Grinham A., Taillardat P., Rosentreter J.A., Webb J., Iram N., Al-Haj A.N., Macreadie P.I. Methane and nitrous oxide emissions complicate the climate benefits of teal and blue carbon wetlands // One Earth. 2022. V. 5. No. 12. P. 1336–1341. doi: 10.1016/j.oneear.2022.11.003.
10. Marín-Muñiz J.L., Hernández M.E., Moreno-Casasola P. Comparing soil carbon sequestration in coastal freshwater wetlands with various geomorphic features and plant communities in Veracruz, Mexico // Plant Soil. 2014. V. 378. No. 1–2. P. 189–203. doi: 10.1007/s11104-013-2011-7
11. Moyo S. Carbon sequestration and fluxes // Fundamentals of tropical freshwater wetlands / Eds. T. Dalu, R.J. Wasserman. Elsevier, 2022. P. 111–131. doi: 10.1016/B978-0-12-822362-8.00016-5
12. Nahlik A.M., Mitsch W.J. Methane emissions from tropical freshwater wetlands located in different climatic zones of Costa Rica // Global Change Biol. 2011. V. 17. No. 3. P. 1321–1334. doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02190.x
13. Ito T. The Venice system for the classification of marine waters according to salinity: symposium on the classification of brackish waters, Venice, 8–14 April 1958 // Jpn. J. Limnol. 1959. V. 20. No. 3. P. 119–120 (in Japanese). doi: 10.3739/rikusui.20.119
14. Chambers L.G., Osborne T.Z., Reddy K.R. Effect of salinity-altering pulsing events on soil organic carbon loss along an intertidal wetland gradient: a laboratory experiment // Biogeochemistry. 2013. V. 115. No. 1–3. P. 363–383. doi: 10.1007/s10533-013-9841-5

15. Nie M.H., Liu M., Hou L.J., Lin X., Li Y., Yan C.X., Yang Y. Seasonal variation of soil respiration and its influence factors in tidal flat of Yangtze Estuary // *Acta Scientiae Circumstantiae*. 2011. V. 31. No. 4. P. 824–831.
16. Howard J.L., Creed J.C., Aguiar M.V.P., Fourqurean J.W. CO₂ released by carbonate sediment production in some coastal areas may offset the benefits of seagrass “Blue Carbon” storage // *Limnol. Oceanogr.* 2018. V. 63. No. 1. P. 160–172. doi: 10.1002/lno.10621
17. Murguia-Flores F., Jaramillo V.J., Gallego-Sala A. Assessing methane emissions from tropical wetlands: Uncertainties from natural variability and drivers at the global scale // *Global Biogeochem. Cycles*. 2023. V. 37. No. 9. Article No. e2022GB007601. doi: 10.1029/2022GB007601
18. Neubauer S.C., Piehler M.F., Smyth A.R., Franklin R.B. Saltwater intrusion modifies microbial community structure and decreases denitrification in tidal freshwater marshes // *Ecosystems*. 2019. V. 22. P. 912–928. doi: 10.1007/s10021-018-0312-7
19. Navada S., Vadstein O. Salinity acclimation strategies in nitrifying bioreactors // *Front. Mar. Sci.* 2022. V. 9. Article No. 867592. doi: 10.3389/fmars.2022.867592
20. Examination and description of soil profiles // *Soil Survey Manual*. 2017 [Internet resource] <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-09/SSM-ch3.pdf> (Accessed: 03.02.2026).
21. Qiu S., Zhang X., Xia W., Li Z., Wang L., Chen Z., Ge S. Effect of extreme pH conditions on methanogenesis: methanogen metabolism and community structure // *Sci. Total Environ.* 2023. V. 877. Article No. 162702. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.162702
22. Hirota M., Senga Y., Seike Y., Nohara S., Kunii H. Fluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide in two contrastive fringing zones of coastal lagoon, Lake Nakaumi, Japan // *Chemosphere*. 2007. V. 68. No. 3. P. 597–603. doi: 10.1016/j.chemosphere.2007.01.002
23. Sprott G.D., Patel G.B. Ammonia toxicity in pure cultures of methanogenic bacteria // *Syst. Appl. Microbiol.* 1986. V. 7. No. 2–3. P. 358–363. doi: 10.1016/S0723-2020(86)80034-0
24. Zhilina T.N., Zavarzin G.A. Alkaliphilic anaerobic community at pH 10 // *Curr. Microbiol.* 1994. V. 29. No. 2. P. 109–112. doi: 10.1007/BF01575757
25. Sim A.K.F., Ishak C.F., Hanif A.H.M., Melling L. Effect of N fertilization on N₂O emission from a tropical peat soil: a laboratory incubation study // *Peatlands in Balance: proceedings of the 14th International Peat Congress*. Stockholm, 2012. P. 3–8.
26. Thomsen J.K., Geest T., Cox R.P. Mass spectrometric studies of the effect of pH on the accumulation of intermediates in denitrification by *Paracoccus denitrificans* // *Appl. Environ. Microbiol.* 1994. V. 60. No. 2. P. 536–541. doi: 10.1128/AEM.60.2.536-541.1994
27. Lei J., Fan Q., Yu J., Ma Y., Yin J., Liu R. A meta-analysis to examine whether nitrification inhibitors work through selectively inhibiting ammonia-oxidizing bacteria // *Front. Microbiol.* 2022. V. 13. Article No. 962146. doi: 10.3389/fmicb.2022.962146
28. Pan Y., She D., Shi Z., Cao T., Xia Y., Shan J. Salinity and high pH reduce denitrification rates by inhibiting denitrifying gene abundance in a saline-alkali soil // *Sci. Rep.* 2023. V. 13. No. 2155. Article No. 2155. doi: 10.1038/s41598-023-29311-7
29. Hu M., Ren H., Ren P., Li J., Wilson B.J., Tong C. Response of gaseous carbon emissions to low-level salinity increase in tidal marsh ecosystem of the Min River estuary, southeastern China // *J. Environ. Sci.* 2017. V. 52. P. 210–222. doi: 10.1016/j.jes.2016.05.009
30. Ma J., Wang Z.Y., Stevenson B.A., Zheng X.J., Li Y. An inorganic CO₂ diffusion and dissolution process explains negative CO₂ fluxes in saline/alkaline soils // *Sci. Rep.* 2013. V. 3. No. 1. Article No. 2055. doi: 10.1038/srep02025
31. Wang X., Jiang Z., Li Y., Kong F., Xi M. Inorganic carbon sequestration and its mechanism of coastal saline-alkali wetlands in Jiaozhou Bay, China // *Geoderma*. 2019. V. 351. P. 221–234. doi: 10.1016/j.geoderma.2019.05.027
32. Danevčič T., Mandić-Mulec I., Stres B., Stopar D., Hacin J. Emissions of CO₂, CH₄ and N₂O from Southern European peatlands // *Soil Biol. Biochem.* 2010. V. 42. No. 9. P. 1437–1446. doi: 10.1016/j.soilbio.2010.05.004
33. Kirui B., Huxham M., Kairo J.G., Mencuccini M., Skov M.W. Seasonal dynamics of soil carbon dioxide flux in a restored young mangrove plantation at Gazi Bay // *Advances in Coastal Ecology: People, Processes and Ecosystems in Kenya* / Eds. J. Hoorweg, N. Muthiga. Leiden: African Studies Centre, 2009. V. 20. P. 122–130.
34. Chen G.C., Tam N.F.Y., Ye Y. Spatial and seasonal variations of atmospheric N₂O and CO₂ fluxes from a subtropical mangrove swamp and their relationships with soil characteristics // *Soil Biol. Biochem.* 2012. V. 48. P. 175–181. doi: 10.1016/j.soilbio.2012.01.029
35. Allen D.E., Dalal R.C., Rennenberg H., Meyer R.L., Reeves S., Schmidt S. Spatial and temporal variation of nitrous oxide and methane flux between subtropical mangrove sediments and the atmosphere // *Soil Biol. Biochem.* 2007. V. 39. No. 2. P. 622–631. doi: 10.1016/j.soilbio.2006.09.013
36. Marín-Muñoz J.L., Hernández M.E., Moreno-Casasola P. Greenhouse gas emissions from coastal freshwater wetlands in Veracruz Mexico: Effect of plant community and seasonal dynamics // *Atmos. Environ.* 2015. V. 107. P. 107–117. doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.02.036
37. Smith K.A., Ball T., Conen F., Dobbie K.E., Massheder J., Rey A. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes // *Eur. J. Soil. Sci.* 2018. V. 69. No. 1. P. 10–20. doi: 10.1111/ejss.12539
38. Chanda A., Akhand A., Manna S., Dutta S., Das I., Hazra S., Rao K.H., Dadhwal V.K. Measuring daytime CO₂ fluxes from the inter-tidal mangrove soils of Indian Sundarbans // *Environ. Earth Sci.* 2014. V. 72. No. 2. P. 417–427. doi: 10.1007/s12665-013-2962-2
39. Torres-Alvarado M.D.R., Pérez Muñoz T., Maldonado-Vela N.B. Methanogenesis in sediments of a tropical coastal wetland: a culture-dependent method // *Revista de Biología Tropical*. 2024. V. 72. No. 1. Article No. e57126. doi: 10.15517/rev.biol.trop.v72i1.57126