

УДК 552.578

ЭМИССИЯ МЕТАНА РИСОВЫМИ ПОЛЯМИ РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2023 г. Д. Н. Гарькуша^a, * (ORCID: 0000-0001-5026-2103), Ю. А. Фёдоров^a,
Н. С. Тамбиева^b, Е. В. Мельников^c^aИнститут наук о Земле Южного федерального университета, ул. Р. Зорге, 40, Ростов-на-Дону, 344090 Россия^bГидрохимический институт, пр. Стачки, 198, Ростов-на-Дону, 344090 Россия^cООО “Энергия”, Промышленное ш., 7, Пролетарск, 347540 Россия

*e-mail: gardim1@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.01.2023 г.

После доработки 10.04.2023 г.

Принята к публикации 11.04.2023 г.

Проанализированы результаты полевых измерений камерным методом потоков метана в атмосфере с рисовых полей Ростовской области (юг Европейской России). Помимо измерения потоков метана в фазы всходов и полной спелости риса, в воде и различных горизонтах обводненных почв рисового чека определены концентрация метана и сероводорода, Eh, рН, плотность и влажность. Поток метана в атмосферу с рисового чека варьировал в диапазоне от 0.195 до 0.531 мг CH₄/(м² ч) и в фазе полной спелости риса в среднем был в 2.1 раза выше, чем в фазе всходов. Скорость потока метана в атмосферу с поверхности необводненных почв, расположенных между рисовыми чеками, в среднем была в 4.9–12.1 раз ниже, чем скорость его потока с рисовых чеков, изменяясь в пределах 0.034–0.045 мг CH₄/(м² ч). Показано, что после обводнения рисовых чеков в изолированных слое воды почвах снижаются значения Eh и, как следствие, происходит увеличение концентраций метана в почвах и его потоков в атмосферу. Согласно проведенной оценке, суммарная эмиссия метана рисовыми полями Ростовской области ориентировочно достигает 1.253 т/сут или 150 т/год, что составляет 0.4–1.5% от годового выделения метана почвами Ростовской области.

Ключевые слова: почвы рисовых чеков, парниковые газы, анаэробные газы, сероводород

DOI: 10.31857/S0032180X23600051, **EDN:** OIJNQM

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одной из актуальных экологических проблем является глобальное изменение климата, обусловленное увеличением содержания в атмосфере Земли парниковых газов (CO₂, CH₄, N₂O и пары H₂O) [8, 34, 35]. Несмотря на относительно низкие концентрации метана в атмосфере, из-за своей высокой поглощающей способности теплового излучения Земли, он является вторым по значимости парниковым газом после CO₂ [42].

Большая часть атмосферного метана имеет бактериальное (биогенное) происхождение и полностью контролируется потоками с земной поверхности [29, 43]. Общая эмиссия метана в атмосферу оценивается в 500–600 Тг в год с ежегодными колебаниями в стоках и источниках [45]. Одним из основных антропогенных источников эмиссии современного биогенного метана в атмосферу служат рисовые поля (рисовые чеки), относящиеся к своеобразному переходному (между наземными и аквальные) типу техногенного ландшафта [41]. Эмиссия метана с 1 м² рисовых полей нередко

превосходит аналогичные показатели расположенных в тех же широтах болотных экосистем. Этот факт объясняется меньшим окислением метана в пределах рисовых чеков, поскольку из них он выносится в атмосферу по стеблям риса, избегая воздействия метанооксилирующих бактерий [2, 44].

По оценкам Межправительственной группы экспертов по изменению климата с рисовых полей мира ежегодно выделяется от 20 до 100 Тг в год [34], что составляет 3–20% от общего объема глобальных выбросов из всех природных и антропогенных источников. Эти значения эмиссии метана основаны на полевых измерениях его потоков с рисовых полей в США, Испании, Италии, Китае, Индии, Австралии, Японии и Таиланде. Следует отметить, что на территории бывшего СССР (юг Одесской области) в середине 80-х годов прошлого века сотрудниками МГУ им. М.В. Ломоносова проведены немногочисленные натурные измерения камерным методом эмиссии метана в атмосферу из затопленных под культуру риса почв [11, 12].

Имеющиеся оценки суммарной эмиссии метана с рисовых полей бывшего СССР [1, 13] и со-

временной России [6, 19, 20] выполнены расчетным путем на основе осредненных значений (20 и 40 г $\text{CH}_4/(\text{м}^2 \text{ год})$), полученных по результатам полевых измерений потоков метана с рисовых полей мира, расположенных во влажных тропиках и субтропиках, и приведенных в работах [22, 33, 37]. Согласно оценкам [6], общая годовая эмиссия метана для рисовых полей России составляет 0.1 млн т, а для бывшего СССР варьирует от 0.14 [1] до 0.25 [13] млн т. При этом вклад рисовых полей России в общий выброс метана в аграрном секторе страны в среднем не превышает 2.5% [19].

Известно, что температура является одним из важных факторов, контролирующих образование, концентрацию и потоки метана из почв и рисовых чеков [3, 24, 36, 38, 44]. Поэтому оценка эмиссии метана, основанная на натурных измерениях его потоков на рисовых полях в России, расположенных в умеренной климатической зоне, будет несколько отличаться от вышеприведенных расчетных значений. Имеющиеся различия в технологиях выращивания риса в умеренной климатической зоне и зоне влажных тропиков и субтропиков (например, [44]) также будут влиять на ежегодную эмиссию метана рисовыми полями страны.

Цель работы – оценка скорости потока метана в атмосферу рисовыми полями Ростовской области на основе натурных измерений на одном из рисовых чеков сельхозпредприятия ООО “Энергия” (пос. Валуийский, Пролетарский район Ростовской области).

Особенности рисосеяния в Ростовской области. По сведениям Южного филиала ФГБУ “Центр Агроаналитики” 2020 г. [23], Ростовская область находится на третьем месте среди регионов России по севу риса – 14.3 тыс. га, уступая Краснодарскому краю – 117.0 тыс. га и Республике Дагестан – 20.2 тыс. га. В настоящее время в Ростовской области выращиванием риса занимаются сельхозпредприятия, расположенные на правом и левом берегах оз. Маныч, в Мартыновском, Волгодонском и Багаевском районах. Наиболее крупными предприятиями являются АО “Цимлянский” (Мартыновский район), ООО “Маныч-Агро” (Багаевский район), ООО “Энергия” и ООО “Приманычский” (Пролетарский район), ООО “Мелиоратор” и СПК “Большовский” (Волгодонской район). Таким образом, в Ростовской области имеется два массива рисосеяния [10]: первый (I) расположен на правом и левом берегах Веселовского и Пролетарского водохранилищ, созданных на реке Западный Маныч (между г. Пролетарском и станицей Багаевской), и второй (II) – в пойме Дона (рис. 1). В хозяйствах первого и второго массивов посевы под рисом составляют чуть более 10 и 4 тыс. га соответственно.

В Ростовской области, являющейся самым северным регионом рисосеяния в России и мире,

рисовые поля создаются на обвалованных почвах, заливаемых небольшим слоем воды на полгода (весна–лето). На полях нарезаются борозды, чтобы по ним пошла вода при затоплении. При этом поверхность почв должна быть с перепадами рельефа не более 2 см для равномерного распределения воды и предотвращения смыва семян. Посев риса начинают, когда температура почвы на глубине 5 см поднимается выше 12–14°C. Такие условия в зоне рисосеяния в Ростовской области создаются к концу апреля–началу мая [10].

В Ростовской области применяется укороченное затопление, т.е. первоначальный слой воды создается немедленно вслед за посевом, кроме случая с глубокой заделкой семян в почву. На период прорастания риса вода сбрасывается, а постоянный ее слой создается на поле в фазе полных всходов (2–3 листа). Уборку риса проводят в начале–середине сентября. Все работы по посадке, уходу и сбору урожая осуществляются механизированным способом.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Натурные измерения скорости потока метана в атмосферу с обводненных почв рисового чека 1 в фазы всходов (2–3 листа) и полной спелости риса (перед его уборкой), а также с почв обвалования, расположенных между рисовыми чеками (рис. 2), проводили 28 мая и 9 сентября 2021 г. Помимо измерения потоков метана, в различных горизонтах обводненных почв рисового чека определяли концентрацию метана и сероводорода ($\Sigma\text{H}_2\text{S}$), значения Eh и pH, плотность и влажность почв (табл. 1, 2). В воде рисового чека определяли температуру, минерализацию, содержание взвешенных веществ, pH и концентрацию метана. В сентябре 2021 г. концентрацию метана определяли в воде рядом расположенного рисового чека 2 (координаты: 47°01'34.64" N, 41°21'44.39" E), в котором рис был посажен раньше на 2 недели. Кроме этого, 11 июня 2022 г. дополнительно проводили измерения концентрации метана и сероводорода, а также вышеобозначенных физико-химических показателей в воде и обводненных почвах двух рисовых чеков (табл. 3), в том числе чека 1, на котором в 2021 г. поставлены эксперименты по определению эмиссии метана, описываемые в настоящей работе.

Почвы рисового массива, в состав которого входят исследуемые чеки, на большей части площади представлены солонцеватыми разностями темно-каштановых почв.

Отбор проб воды и почв, в том числе в рисовых чеках, и последующее определение метана в них проводили согласно аттестованным методикам [16, 17] с добавлением методических приемов, описанных в работах [3, 25]. Для отбора проб почв

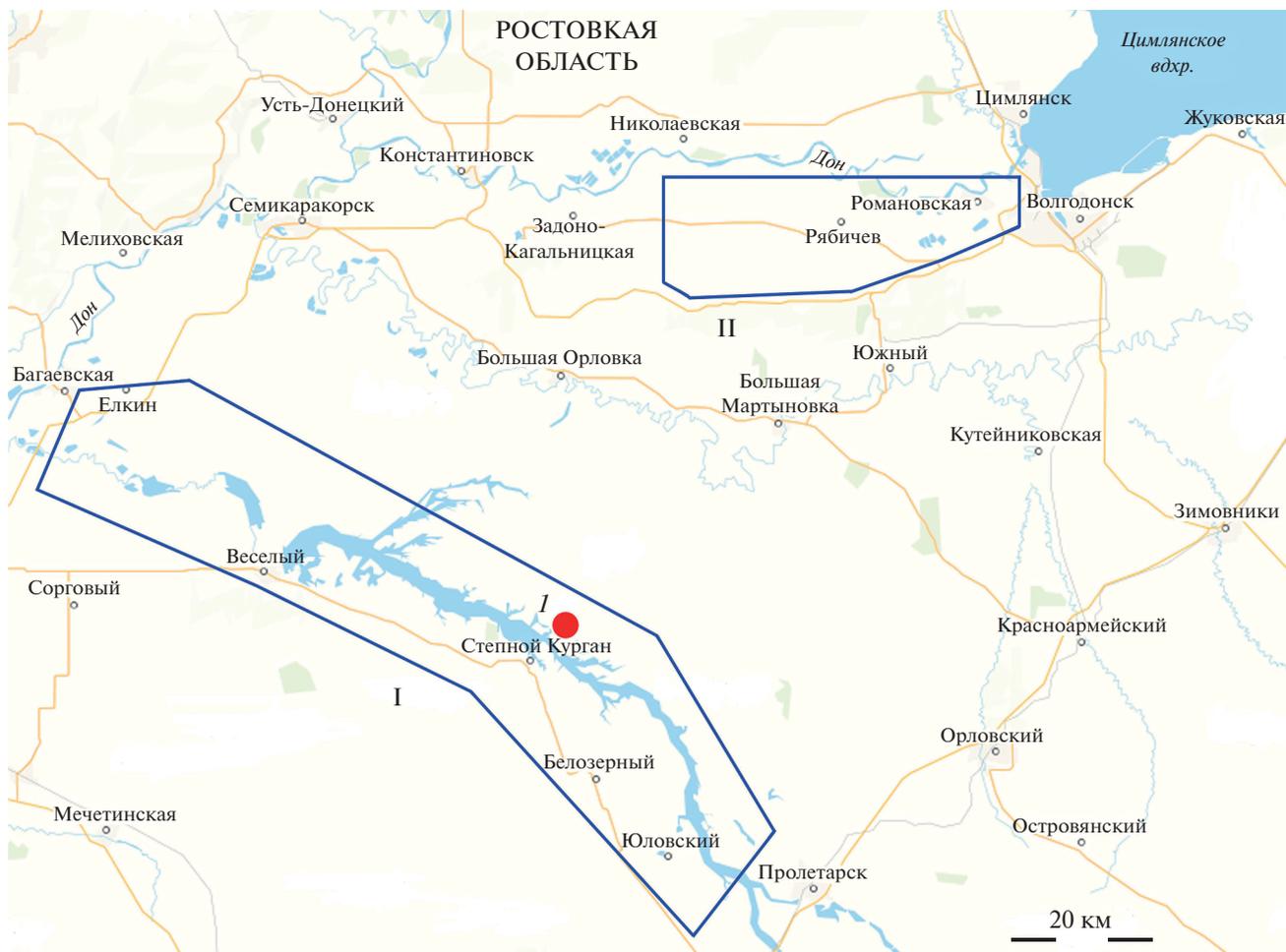


Рис. 1. Местоположение массивов (I, II) рисосеяния в Ростовской области. Красной точкой (I) указан район проведения натуральных измерений потоков метана с рисового чека.

между рисовыми чеками выполняли почвенную прикопку, в стенках которой в слое 0–2 см устройством-мерником отбирали по 3 мл почв. Затопленные почвы рисовых чеков сначала отбирали с помощью специально сконструированной пластиковой трубки длиной 500 мм и диаметром 45 мм с острозаточенными краями и фторопластовым поршнем. Затем из различных горизонтов (максимум до 25 см) извлеченного керна отбирали устройством-мерником по 3 мл почв и вносили в стандартные стеклянные флаконы полной вместимостью 42 мл, заполненные до риски (фиксированный воздушный объем 5 мл) дистиллированной водой с консервантом (HgCl_2). Флаконы приспособлены для парофазного анализа, имеют навинчивающиеся пластмассовые крышки с отверстиями для ввода иглы, резиновыми и фторопластовыми вкладышами для герметизации. После герметизации пробу энергично встряхивали, доводя отобранные почвы до гомогенного состояния во избежание процессов образования и окисления метана внутри них. Одновременно с

отбором проб почв в заранее взвешенные и пронумерованные бюксы отбирали навеску почв для определения плотности и влажности.

Концентрацию метана в пробах почв и воды определяли на газовом хроматографе Хроматэк-Кристалл 5000.2 с дозатором равновесного пара на пламенно-ионизационном детекторе [16, 17]. Выполнение измерений массовой доли сульфидной серы ($\Sigma\text{H}_2\text{S}$) в обводненных почвах основано на переводе сульфидов в сероводород действием соляной кислоты, с последующей отдувкой сероводорода азотом особой чистоты в раствор гидроксида натрия и определением сульфид-ионов фотометрическим методом с N,N -диметил- p -фенилендиамином [18].

Значения pH, Eh и температуры измеряли с помощью портативного ионмера Экотест 2000 сразу после отбора проб. Минерализацию и содержание взвешенных веществ в воде рисового чека определяли по общепринятым в системе Росгидромета стандартным методикам [21].

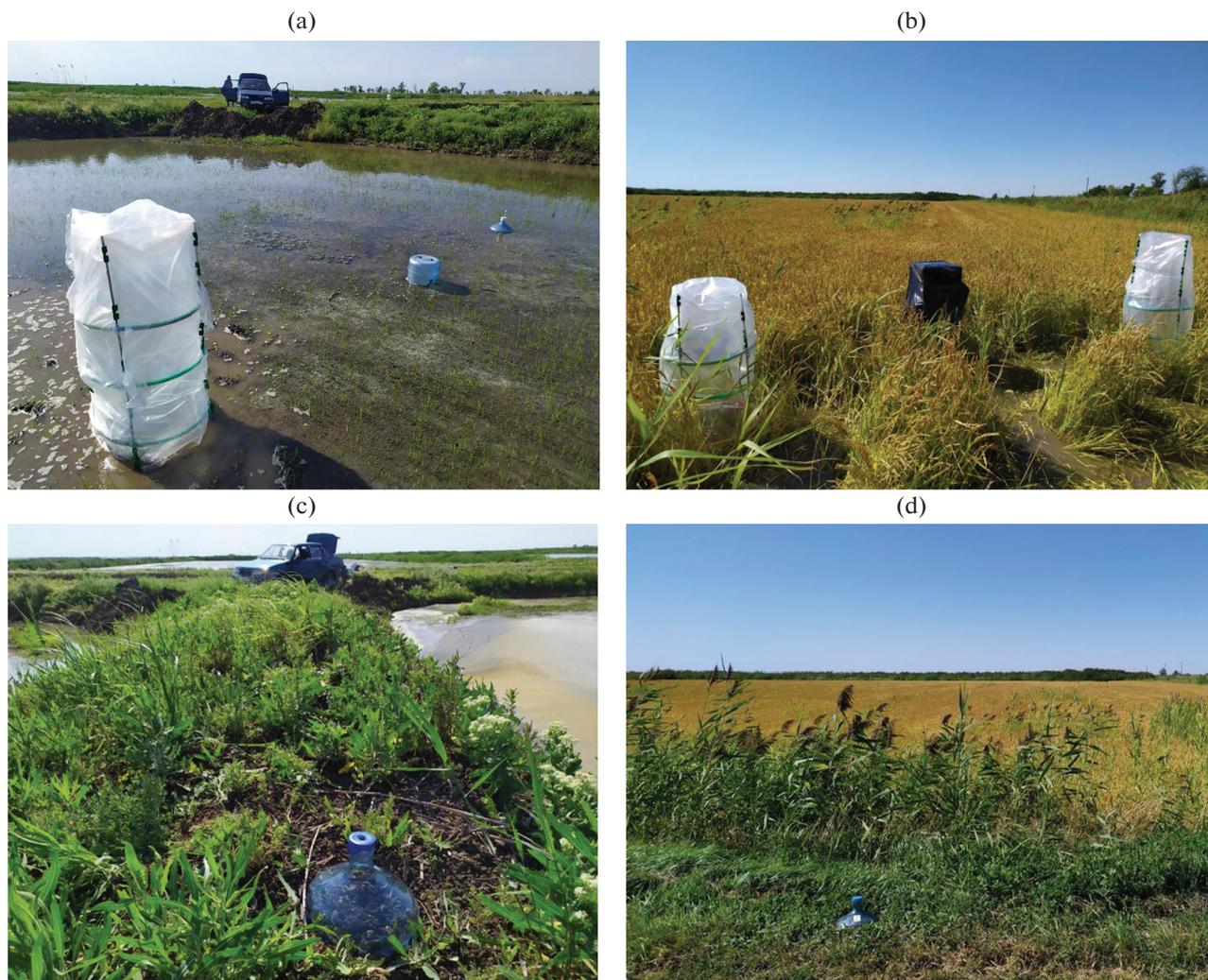


Рис. 2. Эксперименты по измерению потоков метана с рисового поля (а – фаза всходов и б – фаза полной спелости риса) и с поверхности почв, расположенных между рисовыми чеками (с – май и d – сентябрь 2021 г.).

Определение эмиссии метана с поверхности рисовых чеков и почв обвалования заключалось в непосредственном измерении скорости его потока камерным методом с помощью стационарных накопительных камер-ловушек [4, 25, 32] различного размера и конструкции.

В период проведения исследований для измерения потоков метана в фазе всходов риса (май 2021 г.) в рисовом чеке 1 установили две камеры-ловушки: малую ловушку 1 с объемом воздушной фазы 3000 см^3 и площадью основания 539 см^2 и большую ловушку 2 с объемом воздуха 293422 см^3 и площадью основания 2206 см^2 . Экспозиция ловушек в накопительном режиме составляла от 70 до 120 мин. Накопительную камеру, расположенную между большой и малой ловушками (рис. 2а), а также камеру-ловушку с черной полиэтиленовой пленкой (рис. 2б) использовали в экспери-

менте для определения потоков CO_2 , результаты которого в настоящей работе не обсуждаются.

В период проведения исследований для измерения потоков метана в фазе полной спелости риса (сентябрь 2021 г.) в рисовом чеке 1 установили две большие камеры-ловушки: ловушку 1 с объемом воздушной фазы 293422 см^3 и площадью основания 2206 см^2 и ловушку 2 с объемом воздуха 353000 см^3 и площадью основания 2206 см^2 . Экспозиция ловушек в накопительном режиме составляла от 130 до 210 мин.

В оба периода для измерения потоков метана в атмосферу с поверхности почв обвалования, расположенных между рисовыми чеками, установили малые накопительные камеры-ловушки 3 с объемом воздушной фазы 3000 и 4000 см^3 и площадью основания 539 см^2 (рис. 2с, 2д). Экспозиция данных ловушек в накопительном режиме

Таблица 1. Результаты исследования рисового чека 1 в фазу всходов риса, 28.05.2021 г.

| | Местоположение стационарной камеры (ловушки) на потоки метана | Объем воздушной фазы в ловушке, см ³ /площадь основания ловушки, см ² | Время отбора проб на поток CH ₄ /экспозиция | Концентрация CH ₄ , мкг в 2 см ³ воздуха, отобранного шприцем в ловушке* | Средняя скорость потока CH ₄ , мкг CH ₄ /(м ² ч)/мкг CH ₄ /(м ² сут) | Вода рядом с ловушками | | Почвы рядом с ловушками | | | | | | | | | | |
|--|---|---|--|--|---|------------------------|---|--------------------------|--|--|----------------------|--|---|-----------------------|-----|----------------------------|----------------------|----------------------|
| | | | | | | температура, °C/pH | концентрация CH ₄ , мкг/лм ³ /минерализация, мг/лм ³ | горизонт отбора проб, см | концентрация CH ₄ , мкг/г в.п./концентрация CH ₄ , мг/г в.п. | плотность, г/см ³ /влажность, % | pH/Ен, мВ | | | | | | | |
| Ловушка 1. Поставлена в рисовом чеке | | $\frac{3000}{539}$ | $\frac{15 \text{ ч } 25 \text{ мин}}{0 \text{ мин}}$ | 0.010 (1) | 0 | $\frac{31.0}{8.52}$ | $\frac{0.87-1.28(2)}{1035}$ | 0-2 | $\frac{0.065}{<0.005}$ | $\frac{1.639}{30.0}$ | $\frac{7.62}{168.6}$ | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | $\frac{16 \text{ ч } 35 \text{ мин}}{70 \text{ мин}}$ | $\frac{0.022-0.025}{0.023(3)}$ | $\frac{0.217}{5.208}$ | 2-5 | $\frac{0.050}{<0.005}$ | $\frac{1.442}{26.4}$ | $\frac{7.52}{108.2}$ |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ловушка 2. Поставлена в рисовом чеке | | $\frac{293422}{2206}$ | $\frac{15 \text{ ч } 40 \text{ мин}}{0 \text{ мин}}$ | 0.010 (1) | 0 | - | - | - | - | - | - | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | $\frac{17 \text{ ч } 30 \text{ мин}}{110 \text{ мин}}$ | $\frac{0.011}{0.011(2)}$ | $\frac{0.254}{6.096}$ | 0-2 | $\frac{0.013-0.018(2)}{-}$ | - | - |
| Ловушка 3. Поставлена на необводненных темно-каштановых почвах между рисовыми чеками | | $\frac{4000}{539}$ | $\frac{16 \text{ ч } 00 \text{ мин}}{0 \text{ мин}}$ | 0.010 (1) | 0 | - | - | - | - | - | - | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | $\frac{17 \text{ ч } 10 \text{ мин}}{70 \text{ мин}}$ | $\frac{0.011-0.013(2)}{0.011-0.013(2)}$ | $\frac{0.045}{1.080}$ | - | - | | |

* В данном столбце в числителе приведены пределы измерения, в знаменателе – средние значения, в скобках – количество измерений.

Таблица 2. Результаты исследования рисового чека 1 в фазу “полной спелости” риса, 09.09.2021 г.

| Местоположение стационарной камеры (ловушки) на потоки метана | Объем воздушной фазы в ловушке, см ³ /площадь основания ловушки, см ² | Время отбора проб на поток CH ₄ /экспозиция | Концентрация CH ₄ , мкг в 2 см ³ воздуха, отбранного шприцем в ловушке* | Средняя скорость потока CH ₄ , мкг/(м ² ч)/(мг CH ₄ /(м ² сут) | Вода рядом с ловушками | | Почвы рядом с ловушками | | | |
|--|---|--|---|--|------------------------|---|--------------------------|--|--|------------|
| | | | | | температура, °C/pH | концентрация CH ₄ , мкг/лм ³ /минерализация, мг/лм ³ | горизонт отбора проб, см | концентрация CH ₄ , мкг/г в.п./концентрация ΣNH ₂ S, мг/г в.п. | плотность, г/см ³ /влажность, % | pH/ Eh, мВ |
| Ловушка 1. Поставлена в рисовом чеке | 293422 | 12 ч 50 мин | 0,010 (1) | 0 | 19,0 | 1,07–4,52(6) | 0–2 | 0,034 | 1,534 | 7,44 |
| | 2206 | 0 мин | | | 7,43 | 632 | | – | 32,4 | 13,1 |
| | | 15 ч 20 мин | 0,012 (2) | 0,372 | | | 2–5 | 0,070 | 1,612 | 7,26 |
| Ловушка 2. Поставлена в рисовом чеке | | 150 мин | | 8,928 | | | 5–10 | – | 26,9 | –114,4 |
| | | 16 ч 20 мин | 0,013–0,014 (2) | 0,466 | | | 10–15 | – | 1,865 | 7,30 |
| | | 210 мин | | 11,18 | | | | – | 26,5 | –101,0 |
| | 353000 | 13 ч 20 мин | 0,009 (1) | 0 | – | | 0–2 | – | 1,720 | 7,34 |
| | 2206 | 0 мин | | | – | | | 0,046 | 27,3 | –93,6 |
| Ловушка 3. Поставлена на необводненных темно-каштановых почвах между рисовыми чеками | | 15 ч 30 мин | 0,011 (2) | 0,517 | | | | – | – | – |
| | | 130 мин | | 12,41 | | | | – | – | – |
| | | 16 ч 30 мин | 0,012 (2) | 0,531 | | | | – | – | – |
| | | 190 мин | | 12,74 | | | | – | – | – |
| | 3000 | 12 ч 15 мин | 0,008 (1) | 0 | – | | 0–2 | 0,026 | 1,264 | 6,58 |
| 539 | 0 мин | | | | | | – | 17,9 | 246,7 | |
| | | 14 ч 15 мин | 0,011–0,012 (2) | 0,034 | | | | – | – | – |
| | | 120 мин | | 0,816 | | | | – | – | – |
| | | 16 ч 15 мин | 0,016–0,018 (2) | 0,044 | | | | – | – | – |
| | | 240 мин | | 1,056 | | | | – | – | – |

* В данном столбце приведены пределы измерения, в скобках – количество измерений.

Таблица 3. Результаты исследования рисовых чеков 1 и 3 в фазу всходов риса, 11.06.2022 г.

| Местоположение станции отбора проб | Координаты точки отбора проб | Вода в рисовых чеках | | Затопленные почвы рисовых чеков | | | |
|---|-----------------------------------|-----------------------|---|---------------------------------|--|--|----------------------|
| | | температура, °С рН | концентрация СН_4 , мкл/дм ³ / минерализация, мг/дм ³ | горизонт отбора проб, см | концентрация СН_4 , мкг/г в.п. концентрация $\Sigma\text{H}_2\text{S}$, мг/г в.п. | плотность, г/см ³ /влажность, % | рН/Еh, мВ |
| Рисовый чек 1 | 47°01'34.62" N, 41°21'22.39" E | 29.0 | $\frac{1.64-5.54(2)}{648}$ | 0-2 | $\frac{0.115}{0.211}$ | $\frac{1.405}{37.0}$ | $\frac{7.19}{-10.8}$ |
| | | 8.01 | | | $\frac{0.025}{<0.005}$ | $\frac{1.368}{31.6}$ | $\frac{7.29}{-12.8}$ |
| Рисовый чек 3, точка 3-1 | 47°02'25.55" N, 41°17'07.86" E | 28.0 | $\frac{3.02-3.93(2)}{6723}$ | 2-5 | $\frac{0.052}{<0.005}$ | $\frac{1.606}{27.0}$ | $\frac{7.29}{158.8}$ |
| | | 8.22 | | | $\frac{0.083}{<0.005}$ | $\frac{2.090}{25.3}$ | $\frac{7.27}{-1.0}$ |
| Рисовый чек 3, точка 3-2, в 100 м северо-восточнее точки 3-1 | 47°02'27.51" N, 41°17'05.60" E | - | $\frac{1.75}{-}$ | 0-2 | $\frac{0.028}{0.006}$ | $\frac{1.235}{31.1}$ | $\frac{6.91}{28.4}$ |
| | | | | | $\frac{0.021}{<0.005}$ | $\frac{1.849}{29.0}$ | $\frac{7.03}{73.8}$ |
| | | | | 2-5 | $\frac{0.044}{<0.005}$ | $\frac{1.834}{27.4}$ | $\frac{7.07}{75.5}$ |
| | | | | 5-10 | $\frac{0.014}{<0.005}$ | $\frac{1.857}{22.0}$ | $\frac{7.19}{62.7}$ |
| | | | | 10-15 | $\frac{0.063}{<0.005}$ | $\frac{1.819}{22.2}$ | $\frac{7.08}{75.4}$ |
| | | | | 20-25 | | | |

составляла 70 и 120–240 мин соответственно в мае и сентябре.

Применяемые малые ловушки (с объемом воздушной фазы 3000 и 4000 см³) представляют собой пластиковые (поликарбонатные) емкости с открытым основанием и герметичной крышкой со специальным отверстием для забора газовой фазы. Перед измерением данные ловушки устанавливали на поверхность почв (в том числе обводненных почв в рисовых чеках), врезая в почву на глубину 1.2–2.3 см, при этом крышку ловушки оставляли открытой на 10–15 мин для удаления метана, который может выделяться из почвы при врезании ловушки. Затем крышку ловушки закрывали, и шприцем через определенный интервал времени отбирали через специальное отверстие 2 мл пробы газовой смеси и вводили в стандартные стеклянные флаконы для парофазного анализа.

Накопительные камеры-ловушки большего размера сконструированы из пластиковых опор с металлическим стержнем, пластиковых обручей и полиэтиленовой пленки (толщиной 60 мкм). Внутри каждой из больших ловушек, с целью перемешивания воздуха и выравнивания концентраций метана в ее объеме, на одной из опор снизу закрепляли работающий на батарейках небольшой вентилятор. Отбираемые из ловушек шприцем (через полиэтиленовую пленку) с указанной выше периодичностью пробы воздуха объемом 2 мл вводили в стандартные стеклянные флаконы для парофазного анализа, заполненные водой с консервантом (HgCl₂). После отбора пробы отверстие в полиэтиленовой пленке ловушки заклеивали липкой герметичной лентой.

Во всех случаях сразу после установки ловушек отбирали холостую пробу (экспозиция 0 мин). При этом каждый отбор проб проводили в нескольких повторностях (параллельные пробы). Определение концентрации метана в газовой смеси стандартного флакона выполняли с помощью парофазного анализа по методике [17]. Расчет величин потока (F) метана (мг СН₄/(м² ч)) проводили по формуле:

$$F = (CV_1 \times 10000 \times 0.0007 / (V_2ST)) \times 60,$$

где C – разность между концентрациями метана в 2 см³ воздуха, отобранного шприцем в ловушке через время T и холостой пробе, мкл; V_1 – объем воздушной фазы в ловушке, см³; V_2 – объем воздушной фазы, отобранной шприцем в ловушке, см³; S – площадь основания (входного отверстия) ловушки, см²; T – длительность экспонирования ловушки, мин; 10000 – коэффициент для пересчета в м², см²/м²; 0.0007 – коэффициент для пересчета мкл в мг; 60 – коэффициент для пересчета в часы, мин/ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В период натуральных измерений потоков метана на рисовом чеке 1 в фазе всходов (конец мая 2021 г.) концентрация метана в его воде (столб воды до 8–10 см) рядом с ловушками составляла 0.87–1.28 мкл/дм³ (2 пробы), значения рН воды – 8.52, температура воды в 15 ч 30 мин – 31°C, содержание взвешенных веществ – 31.3 мг/дм³, минерализация – 1035 мг/дм³.

Год спустя, концентрация метана в воде этого рисового чека в фазе всходов (начало июня 2022 г.) составляла 1.64–5.54 мкл/дм³ (2 пробы), значения рН воды – 8.01, температура воды в 13 ч 30 мин – 29°C, минерализация – 648 мг/дм³.

В это же время (начало июня 2022 г.) в воде рисового чека 3, расположенного на значительном удалении от рисового чека 1 (с другого края рисового массива), концентрация метана варьировала в пределах 1.75–3.93 мкл/дм³ (в среднем 2.88 мкл/дм³; 3 пробы), значения рН воды составляли 8.22, температура воды в 12 ч – 28°C, минерализация – 6723 мг/дм³. Отметим, что сразу после посадки риса по всей площади рисового чека 3 было внесено большое количество азотных удобрений, с чем, вероятно, связана высокая минерализация его вод. Кроме этого, на значительной площади рисового чека 3, особенно в районе точки 3-2, куда было внесено наибольшее количество азотных удобрений, на поверхности обводненных почв зафиксированы многочисленные газовые пузырьки диаметром до 5–6 мм, их периодический отрыв от почв и поступление в атмосферу; при этом гнилостный, сульфидный и прочие запахи не ощущались. При поднесении горячей спички к поверхности воды над отрывающимися от дна пузырьками газа огонь не вспыхивал. Наряду с низкими концентрациями метана и сероводорода в воде и донных отложениях рисового чека, это свидетельствует о неметановом и несероводородном составе пузырей газа. Внесение большого количества азотных удобрений, вероятно, привело к активизации в аэробном водном слое и на поверхности почв процессов нитрификации с окислением аммиачных форм азота и образованием нитратов [9]. В переходных между аэробной и слабоанаэробной обстановками условиях, наблюдаемых в период исследований в 0–2 см слое затопленных почв (точка 3-2, Eh = 28.4 мВ), по всей видимости, произошла интенсификация процессов денитрификации с образованием как молекулярного азота (N₂), так и газообразных монооксида и диоксида азота (NO и N₂O) [7, 9], являющихся следующими по значимости после метана парниковыми газами, выделяемыми с орошаемых рисовых полей [27].

В период натуральных измерений потоков метана на рисовом чеке 1 в фазе полной спелости риса (сентябрь 2021 г.) концентрация метана в воде

(столб воды до 8–10 см) рядом с ловушками варьировала в пределах 1.07–4.52 мкл/дм³ (в среднем 2.56 мкл/дм³; 6 проб), значения рН воды – 7.43, температура воды в 13 ч – 19°C, минерализация – 632 мг/дм³. Концентрация метана в воде рядом расположенного рисового чека 2, в котором был более спелый рис, составляла 4.62–11.4 мкл/дм³ (2 пробы). В целом, средняя концентрация метана в воде рисовых чеков по всем пробам, отобраным в период исследований в 2021–2022 гг. (13 проб), составила 2.57 мкл/дм³, что на порядок меньше средней концентрации метана в воде нижнего течения р. Дон – 44.9 мкл/дм³ (по [26]).

В мае 2021 г. концентрация метана в верхнем 10-сантиметровом горизонте обводненных почв рисового чека 1 изменялась в диапазоне 0.050–0.065 мкг/г влажной почвы (в среднем 0.058 мкг/г в.п.), с максимальными концентрациями в поверхностном слое 0–2 см. В сентябре концентрация метана в обводненных почвах этого рисового чека заметно увеличилась в 5–10 см горизонте, а в целом по вертикали отобранного керна варьировала в пределах от 0.034 до 1.44 мкг/г влажной почвы (в среднем 0.34 мкг/г в.п.). В то же время по всему отобранному керну обводненных почв в сентябре относительно мая уменьшились значения рН и Eh: рН от 7.47–7.62 (в мае) до 7.26–7.44 (в сентябре) и Eh от 6.4–168.6 (в мае) до –114.4...+13.1 мВ (в сентябре).

В июне 2022 г. концентрация метана в верхнем пятисантиметровом слое обводненных почв рисового чека 1, характеризующихся слабовосстановительной средой (Eh = –12.8...–10.8 мВ) и нейтральным рН (7.19–7.29), составила 0.025–0.115 мкг/г в.п., с максимальными значениями так же как в мае 2021 г. в поверхностном слое 0–2 см. В этом слое выявлена максимальная за все периоды наблюдений концентрация сероводорода – 0.211 мг/г в.п. и влажность обводненных почв – 37%.

Концентрация метана в обводненных почвах рисового чека 3 в июне 2022 г. варьировала в пределах 0.014–0.083 мкг/г (в среднем 0.042 мкг/г; 8 проб), с максимальными значениями в нижних горизонтах. Значения Eh изменялись от –1.0 до +158.8 мВ, рН – от 6.91 до 7.34. Концентрация сероводорода была ниже предела обнаружения (<0.005 мг/г), за исключением одной пробы, отобранной в слое 0–2 см, для которого характерны минимальные значения рН и одно из наименьших значений Eh в данный период наблюдений.

В целом, концентрация метана в затопленных почвах рисовых чеков по всем пробам, отобраным в период исследований в 2021–2022 гг. (17 проб), варьировала в пределах 0.014–1.44 мкг/г (в среднем 0.136 мкг/г, медиана – 0.052 мкг/г). Данные концентрации, если не учитывать единичное “аномальное” значение (1.44 мкг/г), являются

очень низкими для водных объектов [26]. Вероятно, это обусловлено относительно высокими значениями Eh, которые, наряду с содержанием легкоразлагаемого органического вещества [3, 26, 31], являются важным фактором, контролирующим образование метана метаногенными археями как в донных отложениях водоемов и водотоков [26], так и в почвах [3, 23, 43], в том числе в затопленных почвах рисовых чеков [31, 46]. Например, согласно экспериментам [46], критическое значение Eh почвы для активизации образования метана составляло приблизительно от –150 до –160 мВ, при этом в пределах –230...–150 мВ зависимость образования метана от значений Eh почвы была обратно экспоненциальной [46]. В работе [31] значительное увеличение скорости потоков метана из затопленных почв наблюдалось, когда окислительно-восстановительный потенциал почвы был менее –100 мВ. Следует отметить, что метаногены, повсеместно распространенные в почвах [38], в аэробных условиях не погибают, а только подавляются, что позволяет им при осушении рисовых чеков поддерживать численность своей популяции в состоянии низкой активности [28], а при формировании анаэробных условий и наличии питательного субстрата быстро увеличить численность и продукцию метана [38].

Нехарактерное (аномальное) для остального массива данных значение концентрации метана (1.44 мкг/г), зафиксированное в 5–10 см слое затопленных почв рисового чека 1 в сентябре 2021 г., можно объяснить интенсивными процессами метаногенеза в этом слое, обусловленными, помимо анаэробных условий (Eh = –101.0 мВ), наличием в локальных точках повышенных количеств легкоразлагаемого органического вещества, представленного как полуразложившимися растительными остатками (стеблями, корнями и т.д.), так и выделяемыми корнями риса органическими соединениями (корневыми экссудатами) [2, 39].

Для почв обвалования, расположенных между рисовыми чеками, наблюдается возрастание концентраций метана с 0.013–0.018 в мае до 0.026 мкг/г в.п. в сентябре 2021 г. В целом, уровень концентраций метана в почвах обвалования не выходит за пределы фоновых концентраций, характерных для автоморфных почвенных разностей Восточно-Европейской равнины [15]. Значения рН 6.58 в почвах обвалования, измеренные в сентябре, были заметно меньше, чем значения рН обводненных почв, что согласуется со сведениями [40] о повышении рН почв при затоплении. Величина Eh сухих почв составляла 246.7 мВ, что существенно выше, чем в обводненных почвах рисовых чеков.

Анализ корреляционных зависимостей между метаном и исследованными физико-химически-

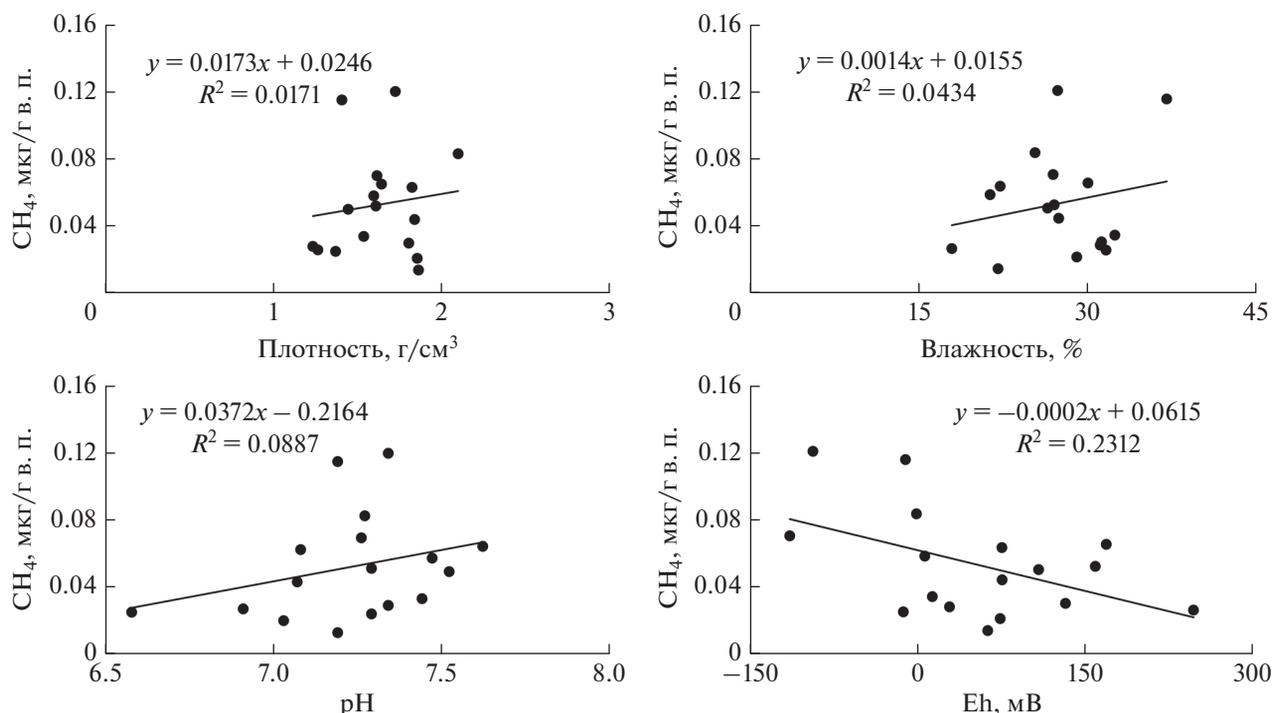


Рис. 3. Зависимость концентраций метана от физико-химических показателей в исследованных обводненных и сухих почвах. При построении зависимостей исключена аномальная концентрация метана (1.44 мкг/г в.п.), не характерная для остального массива данных.

ми показателями почв для всего массива данных (рис. 3) показывает наличие значимой обратной связи между концентрациями метана и значениями Eh ($r = -0.48$, $P < 0.01$), что подтверждает вышесказанное о показателе Eh, как одном из важных факторов, контролирующем образование метана. Также просматриваются менее выраженные незначимые прямые связи ($P > 0.05$) концентраций метана со значениями pH ($r = 0.30$), влажности ($r = 0.21$) и плотности почв ($r = 0.13$).

Данные экспериментальных измерений показывают, что величина эмиссии метана с рисового чека 1 варьирует в фазе всходов в диапазоне от 0.195 до 0.254 мг $\text{CH}_4/(\text{м}^2 \text{ч})$ (в среднем мг $\text{CH}_4/(\text{м}^2 \text{ч})$) и в фазе полной спелости риса — от 0.372 до 0.531 мг $\text{CH}_4/(\text{м}^2 \text{ч})$ (в среднем 0.472 мг $\text{CH}_4/(\text{м}^2 \text{ч})$). Следовательно, в среднем скорость потока метана в фазе полной спелости риса (в сентябре) была в 2.1 раза выше, чем в фазе всходов (в мае). В свою очередь, скорость потока метана в атмосферу с поверхности почв, расположенных между рисовыми чеками, была в среднем в 4.9 раз (в мае) — 12.1 раз (в сентябре) ниже, чем скорость его потока с рисовых чеков, и составляла 0.045 и 0.034–0.044 мг $\text{CH}_4/(\text{м}^2 \text{ч})$ соответственно в мае и сентябре.

Из анализа литературных источников ([40, 44] и ссылок в них) и вышеприведенных данных, в

том числе корреляционных связей, следует, что до затопления рисовых полей в почвах преобладают окислительные процессы, обуславливающие минимальные концентрации метана в них и его потоки в атмосферу. После затопления изолированные слои воды почвы теряют запас кислорода, что приводит к уменьшению окислительно-восстановительного потенциала (значений Eh), активизации процесса метаногенеза, как следствие, происходит увеличение концентрации метана в обводненных почвах рисовых чеков и последующий его перенос с их поверхности в атмосферу. При этом время между затоплением почвы и началом метаногенеза для различных типов почв варьирует в зависимости от структуры и физико-химических свойств почв, но обычно это происходит в течение нескольких дней или недель после затопления [40, 44].

Известны три механизма, с помощью которых метан, образуемый в затопленных почвах, может переноситься в атмосферу [5, 44]: диффузия через слой воды, выделение в составе газовых пузырьков и пассивный транспорт метана через ячейки аэренхимы риса. Считается, что большая часть метана (около 90%) поступает в атмосферу в результате пассивного транспорта через аэренхиму, поскольку этот путь позволяет избежать окисления значительной части метана в системе почва–вода [44]. Метановые пузырьки, образующиеся

при перенасыщении метаном порового пространства затопленной почвы и пробивающиеся на ее поверхность, обычно вносят небольшой вклад в перенос метана в атмосферу, который уменьшается по мере роста растений [30]. При постановке описываемых в настоящей статье экспериментов из-за низких концентраций метана в почвах выделение газовых пузырьков не наблюдалось, что исключает какой-либо заметный вклад этого механизма в установленные нами значения скорости потоков метана. Однако, как отмечено авторами [30], в начале сезона, при наличии большого количества органических веществ в почвах или их внесения в качестве удобрений, газовый перенос может являться важным механизмом транспорта метана в атмосферу. Что касается диффузии метана через вышележащий слой воды, то она считается незначительной (1–2%), поскольку диффузия газов через воду гораздо медленнее транспортировки через воздушное пространство аэренхимы растений [44].

Образование сероводорода для исследованных рисовых чеков в целом не характерно, однако единичное обнаружение заметных концентраций $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ (0.211 мг/г в.п.) в слое 0–2 см затопленных почв с восстановительной обстановкой свидетельствует о протекании процесса сульфатредукции в верхнем слое почв некоторых участков.

В работе [40] представлен большой объем сводной информации о варьировании величин эмиссионных потоков метана, экспериментально измеренных на рисовых полях в различных странах мира. Обобщение этих данных показывает, что потоки метана с рисовых полей изменяются в пределах от 0.02 до 99 мг $\text{CH}_4/(\text{м}^2 \text{ч})$ и существенно варьируют не только в течение вегетационного периода, но и в течение суток [40]. Значительный диапазон варьирования (около 5000 раз) обусловлен сильным различием как в пространстве, так и во времени нескольких факторов, от которых зависят скорости образования и эмиссии метана. Такими факторами, помимо климата, являются тип и текстура почвы, ее физико-химические характеристики (Eh, pH, содержание лабильных органических веществ), сорт и фаза роста риса, а также режим затопления и объем внесения органических и минеральных удобрений [40, 44, 47]. Экспериментально измеренные значения скоростей потоков для затопленных каштановых почв рисовых чеков Ростовской области (0.195–0.531 мг $\text{CH}_4/(\text{м}^2 \text{ч})$), в среднем – 0.365 мг $\text{CH}_4/(\text{м}^2 \text{ч})$) входят в вышеприведенный диапазон варьирования, при этом находятся ближе к его минимальному пределу. Отметим, что полученные значения эмиссии метана для рисовых чеков Ростовской области в целом на порядок ниже значений его эмиссии из затопленных под культуру риса почв юга Одесской области, бывшей УССР, со-

ставляющих 0.11–5.9 мг $\text{CH}_4/(\text{м}^2 \text{ч})$ – для чернозема южного и 4.0–8.3 мг $\text{CH}_4/(\text{м}^2 \text{ч})$ – для лугово-болотных (глеевых) почв [11, 12]. Возможными основными причинами более низкой эмиссии метана могут являться отличия в технологии выращивания риса, в типах почв, а также в климатических условиях Ростовской области, как самого северного региона рисосеяния в мире.

Для расчета суммарной эмиссии метана в атмосферу рисовыми чеками Ростовской области воспользуемся значениями средней скорости потоков метана с их поверхности, составляющей 0.365 мг $\text{CH}_4/(\text{м}^2 \text{ч})$, а также данными по площади сева риса в Ростовской области в 2020 г., составляющей 14.3 тыс. га (или 143 млн м^2) [23]. Как отмечено ранее, в Ростовской области применяют укороченное затопление, когда слой воды создается с момента получения полных всходов (конец мая) и сохраняется до начала полной спелости риса (начало сентября).

Согласно расчетам суммарная эмиссия метана рисовыми полями Ростовской области составляет 1.253 т/сут (или 1.8 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$). Если принять, что время эмиссии метана рисовыми полями Ростовской области составляет в среднем 120 сут в году (с мая по сентябрь), то его годовая эмиссия будет равняться около 150 т (214 тыс. м^3) или 0.4–1.5% от годовой эмиссии метана почвами Ростовской области (9675–40663 т/год (по [4])). Вероятно, что данная величина суммарной эмиссии метана в атмосферу с поверхности рисовых чеков Ростовской области является несколько заниженной, поскольку не включает результаты натурных измерений потоков метана в фазы кушения и цветения, по оценкам [47] характеризующимся максимальными сезонными скоростями эмиссии метана.

Если полученную среднюю величину (0.365 мг $\text{CH}_4/(\text{м}^2 \text{ч})$) пересчитать на всю площадь рисовых полей России (около 200 тыс. га (по [19, 20])), то суточная эмиссия метана рисовыми полями страны составит 17.5 т, а годовая эмиссия – около 2100 т (или 0.0021 млн т). Данная величина составляет всего 2.1% от ранее выполненной расчетным путем оценки (0.1 млн т, по [6]) на основе осредненных значений, которые получены по результатам измерений на рисовых полях, расположенных в иных климатических зонах мира.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В период исследований величина эмиссии метана в атмосферу с поверхности обводненных почв рисового чека варьировала в диапазоне от 0.195 до 0.531 мг $\text{CH}_4/(\text{м}^2 \text{ч})$ и в фазе полной спелости риса в среднем была в 2.1 раза выше, чем в фазе всходов. Скорость потока метана в атмосфе-

ру с поверхности почв обвалования, расположенных между рисовыми чеками, в среднем была в 4.9–12.1 раз ниже, чем скорость его потока с рисовых чеков, изменяясь в пределах 0.034–0.045 мг $\text{CH}_4/(\text{м}^2 \text{ ч})$. До затопления рисовых полей в почвах преобладают окислительные процессы, обуславливающие низкие концентрации метана в них и его потоки в атмосферу. После обводнения рисовых чеков изолированные слои воды почвы теряют запас кислорода, что приводит к уменьшению в них окислительно-восстановительного потенциала (значений Eh), активизации процесса метаногенеза и, как следствие, к возрастанию концентраций метана в обводненных почвах рисовых чеков и потоков метана в атмосферу с их поверхности. По ориентировочным оценкам суммарная эмиссия метана рисовыми полями Ростовской области составляет 1.253 т/сут или около 150 т/год, или 0.4–1.5% от годового выделения метана почвами Ростовской области. Полученные на основе полевых измерений значения скорости потоков метана с рисовых полей Ростовской области могут быть использованы предприятиями юга России, осуществляющими инвентаризацию парниковых газов в аграрной сфере.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00671, <https://rscf.ru/project/22-27-00671/> в Южном федеральном университете.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бажин Н.М.* Метан в окружающей среде: аналитический обзор // Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы. Сер. Экология. Вып. 93. Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2010. 56 с. <https://elibrary.ru/item.asp?id=12992797>. Дата обращения 27.10.2022.
2. *Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А.* Влияние растений на процессы цикла метана в донных отложениях и ризосфере почв // Сибирский экологический журн. 2016. № 6. С. 919–934.
3. *Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С.* Метан в почвах различных географических зон России // Известия РАН. Сер. географическая. 2018. № 3. С. 47–55. <https://doi.org/10.7868/S2587556618030068>
4. *Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Трубник Р.Г., Крукиер М.Л.* Концентрация и эмиссия метана в различных типах почв Ростовской области // Вопросы степеведения. 2022. № 4. С. 13–24.
5. *Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И., Цибарт А.С., Смирнова М.А.* Углеводороды в почвах: происхождение, состав, поведение (обзор) // Почвоведение. 2015. № 10. С. 1195–1209.
6. *Израэль Ю.А., Назаров И.М., Нахутин А.И., Яковлев А.Ф., Гитарский М.Л.* Вклад России в изменение концентрации парниковых газов в атмосфере // Метеорология и гидрология. 2002. № 5. С. 17–27.
7. *Кудеяров В.Н.* Эмиссия закиси азота из почв в условиях применения удобрений (аналитический обзор) // Почвоведение. 2020. № 10. С. 1192–1205.
8. *Кудеяров В.Н., Демкин В.А., Гиличинский Д.А., Горячкин С.В., Рожков В.А.* Глобальные изменения климата и почвенный покров // Почвоведение. 2009. № 9. С. 1027–1042.
9. *Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Велл Р., Лофтфильд Н., Флесса Х.* Газообразные потери и трансформация минерального азота в пахотной буроземной почве в зависимости от влажности // Агрохимия. 2007. № 10. С. 5–13.
10. *Макаров В.В., СерEDA М.В.* Особенности агротехники возделывания риса в Ростовской области // Научный журн. КубГАУ. 2012. № 79. С. 1–10.
11. *Минько О.И., Каспаров С.В., Аммосова Я.М.* Газообразные вещества – продукты метаболизма микробных ценозов переувлажненных почв // Журн. общей биологии. 1987. Т. 48. № 2. С. 182–193.
12. *Минько О.И., Каспаров С.В., Аммосова Я.М., Зборищук Н.Г.* Образование газообразных углеводородов орошаемыми почвами // Биологические науки. 1989. № 1. С. 106–112.
13. *Назаров И.М., Фридман А.И., Фридман Ш.Д. и др.* Антропогенная эмиссия метана в странах СНГ и Прибалтики // Метеорология и гидрология. 1992. № 11. С. 15–20.
14. *Олейник О.А.* Мелиоративное состояние земель рисовых оросительных систем Ростовской области // Научный журн. Российского НИИ проблем мелиорации. 2011. № 4. С. 1–19.
15. *Пиковский Ю.И., Смирнова М.А., Геннадиев А.Н., Завгородняя Ю.А., Жидкин А.П., Ковач Р.Г., Кошовский Т.С.* Параметры нативного углеводородного состояния почв различных биоклиматических зон // Почвоведение. 2019. № 11. С. 1307–1321.
16. РД 52.24.511-2013. Массовая доля метана в донных отложениях. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. Ростов-на-Дону: Росгидромет, ГУ “Гидрохимический институт”. 2013. 19 с.
17. РД 52.24.512-2012. Объемная концентрация метана в водах. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. Ростов-на-Дону: Росгидромет, ГУ “Гидрохимический институт”. 2012. 23 с.
18. РД 52.24.525-2011. Массовая доля сульфидной серы в донных отложениях. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с N,N-диметил-п-фенилендиамином. Ростов-на-Дону: Росгидромет, ГУ “Гидрохимический институт”, 2011. 26 с.
19. *Романовская А.А.* Выбросы метана и закиси азота в аграрном секторе России // Метеорология и гидрология. 2008. № 2. С. 87–97.
20. *Романовская А.А., Коротков В.Н., Смирнов Н.С., Карабань Р.Т., Трунов А.А.* Оценка вклада землепользования в антропогенную эмиссию парнико-

- вых газов на территории России в течение 2000–2011 гг. // Метеорология и гидрология. 2014. № 3. С. 5–18.
21. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши / Под ред. Боевой Л.В. Ростов-на-Дону: НОК, 2009. Ч. 1. 1044 с.
 22. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов. Программа МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов. Хаяма, Канагава: МГЭИК, 2006. 26 с. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.un-gsp.org/sites/default/files/documentos/ghg_booklet_russian_final.pdf. Дата обращения 27.10.2022.
 23. С 2017 по 2020 год урожайность риса в Ростовской области выросла на 23%. ФГБУ “Центр Агроаналитики”. 08.06.2021 г. <https://specagro.ru/news/202106/v-rostovskoy-oblasti-aktivno-razvivaetsya-proizvodstvo-risa>. Дата обращения 27.10.2022.
 24. Федоров Ю.А., Сухоруков В.В., Трубник Р.Г. Аналитический обзор: эмиссия и поглощение парниковых газов почвами. Экологические проблемы // Антропогенная трансформация природной среды. 2021. Т. 7. № 1. С. 6–35. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2021-1-6-34>
 25. Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н. Эмиссия метана почвами степной зоны Ростовской области // Известия Русского географического общества. 2010. Т. 142. Вып. 2. С. 45–52.
 26. Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н., Хорошевская В.О. Метан в водных экосистемах. Ростов-на-Дону: ЗАО “Ростиздат”, 2007. 330 с.
 27. Akiyama H., Yagi K. Direct N₂O emissions from rice paddy fields: Summary of Available Data // Global Biogeochemical Cycles. 2005. V. 19. P. GB1005. <https://doi.org/10.1029/2004GB002378>
 28. Conrad R. Control of microbial methane production in wetland rice fields // Nutr. Cycl. Agroecosys. 2002. V. 64. P. 59–69. <https://doi.org/10.1023/A:1021178713988>
 29. Conrad R. The global methane cycle: recent advances in understanding the microbial processes involved // Env. Microbiol. Rep. 2009. V. 1. P. 285–292. <https://doi.org/10.1111/j.1758-2229.2009.00038.x>
 30. Denier van der Gon H.A.C., Neue H.U. Influence of organic matter incorporation on the methane emission from a wetland rice field // Global Biogeochem. Cycl. 1995. V. 9. P. 11–22.
 31. Gaihre Y.K., Wassmann R., Villegas-Pangga G. Impact of elevated temperatures on greenhouse gas emissions in rice systems: Interaction with straw incorporation studied in a growth chamber experiment // Plant and Soil. 2013. V. 373. P. 857–875. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1852-4>
 32. Gar'kusha D.N., Sukhorukov V.V. Methane Emissions by Reed Formations on the Azov Sea Coast // OnLine J. Biol. Sci. 2019. V. 19. P. 286–295. <https://doi.org/10.3844/ojbsci.2019.286.295>
 33. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. IPC-IGES-OECD-IEA, Japan, 2000. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english>
 34. IPCC Climate Change 1996. Scientific and technical analysis of impacts, adaptations and mitigation // Contribution of working group II to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. London: Cambridge University Press, 1996. 1535 p.
 35. IPCC Climate Change 2014. Synthesis Report // Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland, 2014. 151 p.
 36. Khalil M.A., Shearer M.J. Decreasing emissions of methane from rice agriculture // Int. Congress Series. 2006. V. 1293. P. 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.ics.2006.03.003>
 37. Matthews E., Fung I., Lerner J. Methane emission from rice cultivation: geographic and seasonal distribution of cultivated areas and emission // Global Biogeochem. Cycles. 1991. V. 5. P. 3–24. <https://pubs.giss.nasa.gov/abs/ma03400p.html>. Дата обращения 27.10.2022
 38. Nazaries L., Murrell J.C., Millard P., Baggs L., Singh B.K. Methane, microbes and models: Fundamental understanding of the soil methane cycle for future predictions // Environ. Microbiol. 2013. V. 15. P. 2395–2417. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.12149>
 39. Nguyen C. Rhizodeposition of organic C by plants: mechanisms and controls // Sustainable Agriculture. Dordrecht: Springer, 2009. P. 97–123. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8_9
 40. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual. Workbook. V. 2. Module 4: Agriculture. P. 1–20. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs5c.html>
 41. Saunio M., Stavert A.R., Poulter B., Bousquet P., Canadell J.G. et al. The Global Methane Budget 2000–2017 // Earth Sys. Sci. 2020. V. 12. P. 1561–1623. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>
 42. Seinfeld J.H. Insights on Global warming // AIChE J. 2011. V. 57. P. 3259–3284. <https://doi.org/10.1002/aic.12780>
 43. Serrano-Silva N., Sarria-Guzman Y., Dendooven L., Luna-Guido M. Methanogenesis and methanotrophy in soil: A review // Pedosphere. 2014. V. 24. P. 291–307. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(14\)60016-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(14)60016-3)
 44. Smartt A.D., Brye K.R., Norman R.J. Methane Emissions from Rice Production in the United States: A Review of Controlling Factors and Summary of Research // Greenhouse Gases. Ch.: 8. London: In-Tech, 2016. P. 179–207. <https://doi.org/10.5772/62025>
 45. Wallenius A.J., Dalcin Martins P., Slomp C.P., Jetten M.S.M. Anthropogenic and Environmental Constraints on the Microbial Methane Cycle in Coastal Sediments // Front. Microbiol. 2021. V. 12. P. 631621. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.631621>
 46. Wang Z.P., Delaune R.D., Patrick W.H., Jr., Masscheleyn P.H. Soil Redox and pH Effects on Methane Production in a Flooded Rice Soil // Soil Sci. Soc. Am. J. 2009. V. 57. P. 382–385. <https://doi.org/10.2136/sssaj1993.03615995005700020016x>
 47. Wang Z.-Y., Xu Y.-C., Li Z., Guo Y.-X., Wassmann R., Nene H.U., Lantin R.S., Buendia L.V. Methane emission from irrigated rice fields and its control // Acta Agron. Sinica. 2001. V. 27. P. 757–768.

Methane Emissions from Rice Fields of the Rostov Region

D. N. Gar'kusha^{1, *}, Yu. A. Fedorov¹, N. S. Tambieva², and E. V. Mel'nikov³

¹*Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344090 Russia*

²*Hydrochemical Institute, Rostov-on-Don, 344090 Russia*

³*Agricultural enterprise LLC "Energy", Proletarsk, 347540 Russia*

**e-mail: gardim1@yandex.ru*

On the example of the Rostov region, the results of measurements by the chamber method of methane fluxes into the atmosphere from rice fields are analyzed. In addition to measuring methane fluxes in the phases of "germination" and "full ripeness" of rice, concentrations of methane and hydrogen sulfide, Eh, pH, density and humidity were determined in the water of the rice check and various horizons of watered soils. The rate of methane flow into the atmosphere from the surface of the rice check varied in the range from 0.195 to 0.531 mg CH₄/(m² h) and in the "full ripeness" phase of rice was on average 2.1 times higher than in the "germination" phase. The rate of methane flow into the atmosphere from the surface of soils located between rice checks was on average 4.9–12.1 times lower than the rate of its flow from rice checks, varying within 0.034–0.045 mg CH₄/(m² h). It is shown that after watering rice checks in soils isolated by a layer of water, Eh values decrease and, as a consequence, there is an increase in methane concentrations in soils and its fluxes into the atmosphere. According to the assessment, the total methane emission by rice fields of the Rostov region approximately reaches 1.253 tons per day or 150 tons/year, which is 0.4–1.5% of the annual methane release by the soils of the Rostov region.

Keywords: rice check soils, greenhouse gases, anaerobic gases, hydrogen sulfide, emission