

**ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ, ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ И ГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТОВ /
PHYSICAL GEOGRAPHY AND BIOGEOGRAPHY, SOIL GEOGRAPHY AND LANDSCAPE GEOCHEMISTRY**

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.58>

**ОСОБЕННОСТИ СУТОЧНОЙ ЭМИССИИ МЕТАНА В СИСТЕМЕ «ЧЕРНОЗЕМНЫЕ ПОЧВЫ –
АТМОСФЕРА» И ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВ НА СКОРОСТЬ ЕГО ПОТОКОВ**

Научная статья

Гарькуша Д.Н.^{1,*}, Фёдоров Ю.А.², Трубник Р.Г.³, Дмитрик Л.Ю.⁴, Бэллинджер О.Ю.⁵, Кузнецова Е.В.⁶

¹ORCID : 0000-0001-5026-2103;

²ORCID : 0000-0001-7411-3030;

³ORCID : 0000-0002-5529-2907;

⁴ORCID : 0000-0002-6314-1383;

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (gardim1[at]yandex.ru)

Аннотация

На двух полигонах с черноземными почвами поставлены суточные эксперименты по измерению потоков метана в системе «почва – атмосфера». При этом периодически проводился искусственный полив одного из полигонов, с целью установления влияния влажности почв на скорость эмиссии метана в атмосферу. Анализ суточной динамики эмиссии метана с поверхности почв в атмосферу показывает, что максимальные скорости его потока фиксируются в светлое время суток. Наблюдается увеличение в 1.1–1.3 раза потоков метана после увлажнения почв. Сделан вывод, что оптимальное время непрерывного нахождения ловушек в накопительном режиме (экспозиция) для оценки потоков метана с поверхности почв в атмосферу должно составлять от 5 до 7 часов.

Ключевые слова: изменение климата, парниковые газы, метан, эмиссия, суточная динамика, концентрация, почвы, карбоновые полигоны, агрохимия.

**SPECIFICS OF DAILY METHANE EMISSIONS IN THE "CHERNOZEM SOILS ATMOSPHERE" SYSTEM AND
THE INFLUENCE OF SOIL MOISTURE ON THE RATE OF METHANE FLOWS**

Research article

Gar'kusha D.N.^{1,*}, Fedorov Y.A.², Trubnik R.G.³, Dmitrik L.Y.⁴, Bellindzher O.Y.⁵, Kuznetsova Y.V.⁶

¹ORCID : 0000-0001-5026-2103;

²ORCID : 0000-0001-7411-3030;

³ORCID : 0000-0002-5529-2907;

⁴ORCID : 0000-0002-6314-1383;

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

* Corresponding author (gardim1[at]yandex.ru)

Abstract

At two polygons with chernozem soils, daily experiments were carried out to measure methane flows in the "soil-atmosphere" system. At the same time, artificial irrigation of one of the polygons was periodically conducted in order to determine the effect of soil moisture on the rate of methane emission into the atmosphere. Analysis of the daily dynamics of methane emission from the surface of soils into the atmosphere shows that the maximum rate of its flow is fixed in daylight hours. Increase in 1.1-1.3 times of methane streams after moistening of soils is observed. It is concluded that the optimum time of continuous presence of traps in the accumulation mode (exposition) to estimate methane flows from the soil surface into the atmosphere should be from 5 to 7 hours.

Keywords: climate change, greenhouse gases, methane, emissions, daily dynamics, concentration, soils, carbon polygons, agrochemistry.

Введение

На современном этапе развития цивилизации одной из актуальных экологических проблем является глобальное изменение климата, обусловленное увеличением содержания в атмосфере Земли парниковых газов. Метан является одним из наиболее значимых парниковых газов, поглощающая способность которого в 20-40 раз превышает поглощающую способность углекислого газа [1], [2].

Большая часть атмосферного метана имеет бактериальное (биогенное) происхождение и полностью контролируется потоками с земной поверхности [3]. По оценкам [4], за 47% глобальной годовой эмиссии метана ответственна его дегазация из почв, главным образом, заболоченных. При этом различные типы почв могут быть как источником эмиссии (выделения) метана в атмосферу, так и его стока (поглощения) из атмосферы, в зависимости от соотношения скоростей образования и окисления метана в почвах, соответственно метанообразующими (метаногенными) археями и метанооксиляющими (метанотрофными) бактериями [5].

В настоящее время имеются многочисленные сведения о потоке метана из почв заболоченных участков и болот тундры и тайги, величина которого варьируется от отрицательных значений, соответствующих поглощению метана почвами, до 1000 мг/м² сутки [6], [11], [17], [18], а также из почв сухих участков тундры и тайги, где величина потока не превышает 14.4 мг/м² сутки [7], [8]. Анализ данных работ показывает, что для почвенных потоков метана

свойственна сезонная и суточная динамика, обусловленная влиянием гидротермических факторов как на активность метаногенных и метанотрофных микроорганизмов, так и на скорость диффузии газа в системе почва-тропосфера. В то же время, несмотря на то, что пахотные почвы являются важным источником парниковых газов в сельском хозяйстве [19], натурные измерения потоков метана из почв степной зоны единичны [20], [21], что не позволяет дать адекватную оценку вклада почвенного покрова в глобальную эмиссию метана. Представляет также большой интерес изучение суточной динамики потока метана пахотными почвами в тропосферу.

Исходя из выше сказанного, на черноземных почвах поставлены эксперименты по определению особенностей суточной динамики эмиссии метана в системе «почва – атмосфера», а также установлению влияния увлажненности на скорость его потоков.

Данное исследование имеет особую актуальность в связи с набирающей популярность в мире и в нашей стране проектами по созданию «карбоновых полигонов», которые представляют собой специально оборудованные участки местности, используемые для разработки и испытаний технологий дистанционного и наземного контроля эмиссии парниковых газов и других значимых для изменения климата параметров, а также для проведения исследований по изучению источников и поглотителей парниковых газов с целью разработки и испытаний технологий контроля углеродного баланса [22].

Материалы и методы исследования

С 6 по 7 августа 2021 г. на черноземных почвах приусадебного участка, расположенного в Западном микрорайоне г. Ростова-на-Дону, на двух полигонах (№№ 1 и 2) поставлены суточные эксперименты по измерению потоков метана в системе «почва – атмосфера» (табл. 1, рис. 1). При этом периодически проводился искусственный полив полигона № 2, с целью установления влияния увлажнения почв на величину эмиссии метана из почв в атмосферу. В ходе суточных наблюдений в поверхностном 0–2 см горизонте почв полигонов определялись концентрации метана, температура, значения Eh, pH, плотности и влажности.

Таблица 1 - Результаты суточного эксперимента по измерению потоков метана в системе «почва – атмосфера» на приусадебном участке в Западном микрорайоне г. Ростова-на-Дону, 6–7 августа 2021 г.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.58.1>

№ полигона и местоположение ловушек на потоки CH ₄	№ ловушки. Дата и время установки ловушки в режим экспозиции	Дата и время отбора проб на поток CH ₄ / Экспозиция, минут	Содержание CH ₄ , мкл в 2,0 мл воздуха, отобранного шприцом в ловушке	Средняя скорость потока CH ₄ , мг/м ² час / мг/м ² сутки	Температура воздуха, °С / Температура почвы, °С	pH почвы / Eh почвы, мВ	Плотность почвы, г/см ³ / Влажность почвы, %	Содержание CH ₄ в почвах, мкг/г влажной почвы / мкг/г сухой почвы
Полигон 1. Ловушки поставлены на сухих черноземах	Ловушка 1. 6 августа 17 ч 30 мин.	6 августа 17 ч 30 мин. 0 минут (холостые пробы)	0,016 (1) *	0	35,0 32,0	6,57 -9,3	1,201 9,8	0,015 0,017
		7 августа 17 ч 30 мин. 1440 минут	0,041-0,042 (2)	0,021 0,504	31,5 28,0			
	Ловушка 2. 6 августа 19 ч 30 мин. 7 августа 5 ч 00 мин. 570 минут 7 августа 5 ч 00 мин. 0 минут (холостые пробы) 12 ч 00 мин. 420 минут	6 августа 19 ч 30 мин. 0 минут (холостые пробы)	0,016 (1)	0	35,0 32,0	6,57 -9,3	1,201 9,8	0,016 0,018
		24 ч 00 мин. 270 минут	0,030-0,032 (2)	0,065 1,560	28,0 28,0			
		7 августа 5 ч 00 мин. 570 минут	0,046-0,049 (2)	0,065 1,560	25,5 25,0			
		7 августа 5 ч 00 мин. 0 минут (холостые пробы)	0,016 (1)	0	25,5 25,0			
		7 августа 5 ч 00 мин. 0 минут (холостые пробы)	0,045 (2)	0,081 1,944	30,5 28,0			
		12 ч 00 мин. 420 минут	0,038-0,039 (2)	0,030 0,720	29,5 27,0			

		<u>19 ч 30 мин.</u> 870 минут						
Полигон 2. Ловушки поставлены на увлажненных черноземах	Ловушка 3. 6 августа 17 ч 30 мин.	6 августа <u>17 ч 30 мин.</u> 0 минут (холостые пробы)	0,016 (1)	- - -	<u>35,0</u> 26,0	- 7,11 -21,3	- 1,631 24,5	- 0,015 0,020 - -
		7 августа <u>17 ч 30 мин.</u> 1440 минут	0,038-0,040 (2)	<u>0,019</u> 0,456	<u>31,5</u> 28,0			<u>0,022</u> 0,029
Полигон 2. Ловушки поставлены на увлажненных черноземах	Ловушка 4. 6 августа 19 ч 30 мин.	6 августа <u>19 ч 30 мин.</u> 0 минут (холостые пробы)	0,016 (1)	- - -	<u>35,0</u> 26,0			
		6 августа <u>24 ч 00 мин.</u> 270 минут	0,034-0,036 (2)	<u>0,082</u> 1,968	<u>28,0</u> 26,0			
	7 августа 5 ч 00 мин.	7 августа <u>5 ч 00 мин.</u> 570 минут	0,043-0,047 (2)	<u>0,059</u> 1,416	<u>25,5</u> 22,0	- 7,11 -21,3	- 1,631 24,5	- 0,015 0,020
		7 августа <u>5 ч 00 мин.</u> 0 минут (холостые пробы)	0,014 (1)	0	<u>25,5</u> 22,0			
		7 августа 5 ч 00 мин.	0,045-0,048 (2)	<u>0,090</u> 2,160	<u>30,5</u> 24,0			
		<u>12 ч 00 мин.</u> 420 минут	0,038 (2)	<u>0,032</u> 0,768	<u>29,5</u> 26,0			
	<u>19 ч 30 мин.</u> 870 минут							

Примечание: * – в скобках приведено количество измерений



Рисунок 1 - Фото ловушек (№№ 1 и 2 – первый полигон), установленных на черноземах естественной влажности (а), и ловушек (№№ 3 и 4 – второй полигон), установленных на черноземах, искусственно увлажняемых в ходе эксперимента (б)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.58.6>

Примечание: ловушки 1'–4' использованы в экспериментах для определения потоков CO₂, результаты которых в настоящей работе не рассматриваются

Отбор проб почв и последующее определение метана в них проведены согласно аттестованной методике [23] с добавлением методических приемов, описанных в работах [20], [24]. Для отбора проб почв выполнялась почвенная прикопка, в стенках которой в горизонтах 0–2 см и 2–5 см устройством-мерником отбирали по 3 мл почв. Отобранные пробы почв с помощью устройства-мерника вносили в стандартные стеклянные флаконы полной вместимостью 42 мл, заполненные до риски дистиллированной водой с консервантом (фиксированный воздушный объем 5 мл). Флаконы приспособлены для парофазного анализа, имеют навинчивающиеся пластмассовые крышки с отверстиями для ввода иглы, резиновыми и фторопластовыми вкладышами для герметизации [23]. 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 массовой доли сухой почвы (с.п.), ее плотности и влажности.

Определение концентрации метана в почвах проведено на газовом хроматографе «Хроматэк-Кристалл 5000.2» с дозатором равновесного пара на пламенно-ионизационном детекторе [23].

Измерение значений pH, Eh и температуры выполнено с помощью портативного иономера «Экотест 2000» сразу после отбора проб.

Определение эмиссии метана с поверхности почвенного покрова в атмосферу заключалось в непосредственном измерении скорости его потока камерным методом с помощью стационарных накопительных камер – ловушек [20], [25], [27] (см. табл. 1). Для замера скорости потока метана использованы стандартные ловушки для накопления CH₄, представляющие собой пластиковые (поликарбонат) емкости с открытым основанием и специальными отверстиями сверху для забора газовой смеси, объемом (V) воздушной фазы 3000 см³ и площадью (S) основания 539 см² (см. рис. 1).

Перед измерением ловушку устанавливали на поверхность почвы, врезаая в почву до заданной метки, при этом крышку ловушки оставляли открытой на 10–15 минут для удаления метана, который может «выдавливаться» из почвы при врезании ловушки. Затем отверстие камеры закрывали крышкой, через которую шприцем через определенный интервал времени отбирали 2 мл пробы газовой смеси и вводили в стандартные стеклянные флаконы для парофазного анализа.

Во всех случаях сразу после установки ловушек, в каждой из них отбирались холостые пробы. При этом каждый отбор проб выполнен в нескольких повторностях (параллельные пробы). Определение концентрации метана в газовой смеси стандартного флакона проводили с помощью парофазного анализа по методике [28]. Поток метана рассчитывали по скорости изменения концентрации метана в воздушной фазе камеры (по коэффициенту линейной регрессии). Параллельно с замером потоков газа рядом с ловушками отбирались пробы почв для определения концентраций метана и других физико-химических показателей (см. выше).

На первом полигоне ловушки №№ 1 и 2 были установлены на достаточно сухие почвы, влажность которых составляла 9.8%.

На втором полигоне ловушки №№ 3 и 4 были установлены на предварительно увлажненные почвы, полив которых осуществлялся дважды:

1) в 17:00 (20 литров на 1 м²) – за 30 и 150 минут, соответственно, до установки стационарных камер-ловушек №№ 3 и 4 в накопительный режим;

2) в 5:00 (10 литров на 1 м²).

После полива влажность почв второго полигона составила 24.5%.

Экспозиция ловушек №№ 1 и 3 в накопительном режиме осуществлялась непрерывно в течение 24 часов (1440 минут) с 17:30 (6 августа) до 17:30 (7 августа). Экспозиция ловушек №№ 2 и 4 в накопительном режиме проводилась с перерывом: в темное время суток (от заката до восхода Солнца) – с 19:30 до 5:00 (570 минут), после чего ловушка была разгерметизирована и снова установлена в накопительном режиме для замера потоков в светлое время суток (от восхода до заката Солнца) – с 5:00 до 19:30 (870 минут).

Отбор проб для определения потоков метана в темный период проводился в 24:00 и 5:00, а в светлое время суток – в 12:00 и 19:30. Во всех случаях сразу после установки ловушек, в каждой из них отбирались холостые пробы. При этом отбор проб выполнялся в нескольких повторностях (параллельные пробы) (см. табл. 1).

Результаты и их обсуждение

Анализ суточной динамики потока метана показывает (рис. 2), что максимальные его скорости как на сухих, так и увлажненных почвах фиксировались в светлое время суток с 5:00 до 12:00: на сухих почвах наибольший поток метана составлял 0.081 мг/м² час, на увлажненных почвах – 0.090 мг/м² час. В темное время суток максимальная скорость потока метана наблюдалась на увлажненных почвах – 0.082 мг/м² в период с 19:30 до 24:00 час, в то время как на сухих почвах на протяжении всей экспозиции скорость потока газа не менялась и составляла 0.065 мг/м² час. Отчетливо наблюдается увеличение потоков метана после увлажнения почв, что характерно как для темного, так и светлого времени суток. Так, искусственное увлажнение привело к увеличению потоков метана в 1.3 раза (или на 0.017 мг/м² час) – в темное время суток, и в 1.1 раза (на 0.009 мг/м²) – в светлое время суток. Это согласуется с выводами [10], [17] о положительном влиянии влажности почв на рост потоков метана в атмосферу. В целом значения измеренных потоков метана из почв входят в диапазон варьирования, полученный ранее для почв Ростовской области [20].

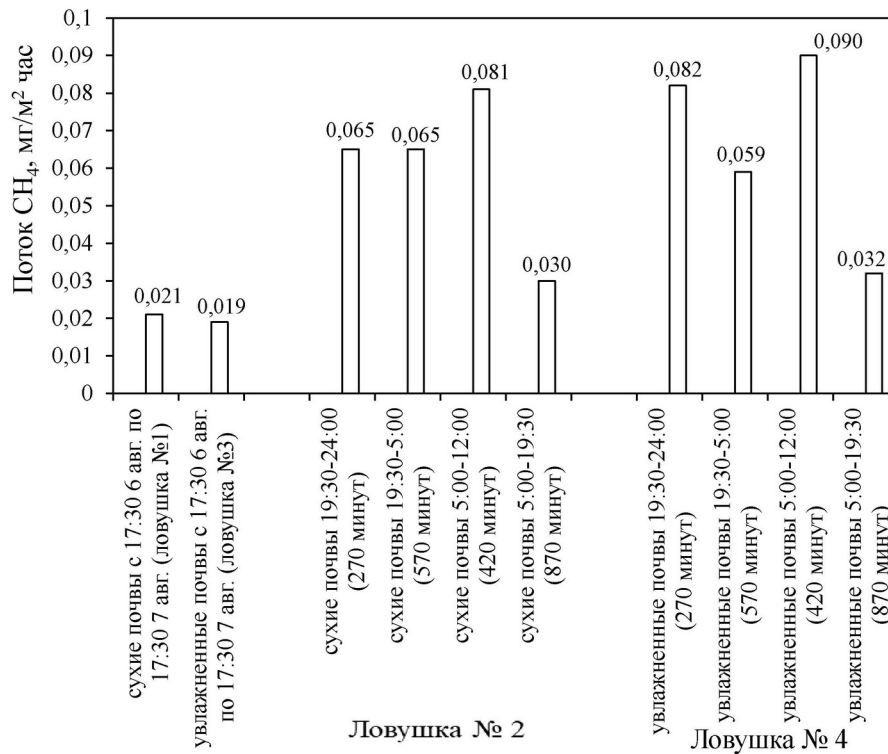


Рисунок 2 - Гистограмма распределения скорости потоков метана в атмосферу с сухих и искусственно увлажненных черноземов Ростовской области (06-07.08.2021 г.)
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.58.3>

Наблюдается тенденция снижения скорости потока метана по мере увеличения времени нахождения ловушек в накопительном режиме, что может быть связано с изменением физико-химических условий (главным образом, Eh) в поверхностном горизонте почв, находящихся под накопительными камерами-ловушками. Особенно значительное снижение потоков наблюдается в ловушках №№ 1 и 3, находившихся в непрерывном накопительном режиме в течение суток. Можно сделать вывод, что длительное нахождение камер-ловушек в накопительном режиме искажает результаты оценки скорости эмиссии метана с поверхности почв в атмосферу в сторону снижения ее величины, что нужно учитывать при планировании экспериментов. Оптимальное время непрерывного нахождения ловушек в накопительном режиме (экспозиция) для оценки потоков метана с поверхности почв в атмосферу, исходя из результатов эксперимента и предшествующего опыта авторов, должно составлять от 5 до 7 часов.

Заключение

Анализ суточной динамики эмиссии метана с поверхности почв в атмосферу показывает, что максимальные скорости его потока фиксируются в светлое время суток. Отчетливо наблюдается увеличение в 1.1–1.3 раза потоков метана после увлажнения почв. Сделан вывод, что оптимальное время непрерывного нахождения ловушек в накопительном режиме (экспозиция) для оценки потоков метана с поверхности почв в атмосферу должно составлять от 5 до 7 часов.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках гос. задания в сфере научной деятельности № 0852-2020-0029.

Благодарности

Авторы благодарят с.н.с. лаборатории методов и технических средств анализа вод Гидрохимического института Н.С. Тамбиеву за определение концентраций метана.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state task in the field of scientific activity No. 0852-2020-0029.

Acknowledgement

The authors are grateful to N.S. Tambieva, senior researcher of the laboratory of methods and technical means of water analysis at the Hydrochemical Institute, for determining methane concentrations.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. 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.
2. Глаголев М.В. Физикохимия и биология торфа. Методы измерения газообмена на границе почва-атмосфера / М.В. Глаголев, А.Ф. Сабреков, В.С. Казанцев – Томск: ТГПУ, 2010. – 104 с.
3. Бажин Н.М. Метан в атмосфере / Н.М. Бажин // Соровский образовательный журнал. – 2000. – Том 6. – № 3. – с. 52-57.
4. IPCC Climate Change, 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – Cambridge ; New York : University Press, 2007. – 1535 p.
5. Le Mer J. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. / J. Le Mer, P. Roger // European J. Soil Biology. – 2001. – Vol. 37. – № 1. – p. 25–50.
6. Слободкин А.И. Образование и потребление метана микроорганизмами в болотах тундры и средней тайги / А.И. Слободкин, Н.С. Паников, Г.А. Заварзин // Микробиология. – 1992. – Т. 61. – № 4. – с. 683-695.
7. Bartlett K.B. Methane emissions from tundra environments in the Yukon-Kuskokwim Delta Alaska. / K.B. Bartlett, P.M. Crill, R.L. Sass et al. // Journal of Geophysical Research D. – 1992. – Vol. 97. – № 15. – p. 16645-16660.
8. Fan S.M. Micrometeorological measurements of CH₄ and CO₂ exchange between the atmosphere and subarctic tundra. / S.M. Fan, S.C. Wofsy, P.S. Bakwin et al. // Journal of Geophysical Research D. – 1992. – Vol. 97, № 15. – p. 16627-16643.
9. Гальченко В.Ф. Биогеохимические процессы цикла метана в почвах, болотах и озерах Западной Сибири / В.Ф. Гальченко, Л.Е. Дулов, Б. Крамер и др. // Микробиология. – 2001. – Т. 70. – № 2. – с. 215-225.
10. Новиков Н.Н. Сезонная динамика эмиссии CO₂, CH₄, N₂O и NO из торфяных почв поймы р. Яхромы. / Н.Н. Новиков, А.Л. Степанов, А.И. Поздняков и др. // Почвоведение. – 2004. – № 7. – с. 867-874.
11. Берестовская Ю.Ю. Процессы образования и окисления метана в почвах заполярной тундры России / Ю.Ю. Берестовская, И.И. Русанов, Л.В. Васильева и др. // Микробиология. – 2005. – Т. 74. – № 2. – с. 261-270.
12. Глаголев М.В. Летне-осенняя эмиссия диоксида углерода метана осушенными торфяниками, измененными при хозяйственном использовании, и естественными болотами (на примере участка Томской области). / М.В. Глаголев, М.В. Чистотин, Н.А. Шнырев и др. // Агрохимия. – 2008. – № 5. – с. 46-58.
13. Кривенко Л.А. Удельные потоки метана из экосистем южной тундры Западной Сибири / Л.А. Кривенко, М.В. Глаголев, И.А. Фастовец и др. // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. – 2014. – Т. 5. – № 1(9). – с. EDCCar0011.
14. Мигловец М.Н. Вертикальные потоки CH₄ и CO₂ в растительных сообществах мезоолиготрофного болота средней тайги / М.Н. Мигловец, О.А. Михайлов, С.В. Загирова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16. – № 1. – с. 193-197.
15. Краснов О.А. Мониторинг эмиссии метана и двуоксида углерода из почвы в атмосферу и параметры почвы. Бакчарское болото Томской области (2014 г.) / О.А. Краснов, S. Maksyutov, Д.К. Давыдов и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2015. – Т. 28. – № 7. – с. 644-654.
16. Конькова В.М. Эмиссия парниковых газов с торфяных почв в условиях Брестской и Минской областей. / В.М. Конькова, А.В. Бурло, И.П. Наркевич // Экологический вестник. – 2016. – № 4 (38). – с. 33-42.
17. Чистотин М.В. Динамика эмиссии метана из осушенной торфяной почвы в зависимости от растительности и режима увлажнения (результаты вегетационного опыта). / М.В. Чистотин, Г.Г. Суворов, А.А. Сиринов // Агрохимия. – 2016. – № 12. – с. 20–33.
18. Веретенникова Е.Э. Временная изменчивость эмиссии метана из верхового болота Западной Сибири / Е.Э. Веретенникова, Е.А. Дюкарев, И.В. Курьина // Оптика атмосферы и океана. – 2022. – Т. 35. – № 2 (397). – с. 162-167.
19. Национальный доклад Российской Федерации о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2013 гг. – Москва : Росгидромет, 2015. – 476 с.
20. Гарькуша Д.Н. Эмиссия метана из почв Ростовской области / Д.Н. Гарькуша, Ю.А. Федоров, Н.С. Тамбиева // Аридные экосистемы. – 2011. – Т. 17. – № 4(49). – с. 44–52.
21. Федоров Ю.А. Аналитический обзор: эмиссия и поглощение парниковых газов почвами. Экологические проблемы / Ю.А. Федоров, В.В. Сухоруков, Р.Г. Трубник // Антропогенная трансформация природной среды. – 2021. – Т. 7. – № 1. – с. 6-34.
22. Иванов А.Л. Глобальный климат и почвенный покров – последствия для землепользования России. / А.Л. Иванов, И.Ю. Савин, В.С. Столбовой и др. // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2021. – № 107. – с. 5–32.
23. РД 52.24.511-2013. Массовая доля метана в донных отложениях. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. – Ростов-на-Дону : Росгидромет, 2013. – 19 с.
24. Гарькуша Д.Н. Метан в почвах различных географических зон России. / Д.Н. Гарькуша, Ю.А. Федоров, Н.С. Тамбиева // Известия РАН. Серия географическая. – 2018. – № 3. – с. 47–55.
25. Федоров Ю.А. Эмиссия метана с торфяных залежей Иласского болотного массива Архангельской области / Ю.А. Федоров, Д.Н. Гарькуша, М.И. Хромов // Известия Русского географического общества. – 2008. – Т. 140. – Вып. 5. – с. 40–48.
26. Федоров Ю.А. Эмиссия метана торфяными залежами верховых болот Псковской област. / Ю.А. Федоров, Д.Н. Гарькуша, Г.В. Шипкова // География и природные ресурсы. – 2015. – № 1. – с. 88–97.

27. Гарькуша Д.Н. Эмиссия метана тростниковой формацией побережья Азовского моря. / Д.Н. Гарькуша, Ю.А. Федоров, В.В. Сухоруков // *Вода: химия и экология*. – 2019. – № 3–6. – с. 78–85.
28. РД 52.24.512-2012. Объемная концентрация метана в водах. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. – Ростов-на-Дону : Росгидромет, 2012. – 23 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. 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.
2. Glagolev M.V. Fizikokhimiya i biologiya torfa. Metody' izmereniya gazoobmena na granice pochva-atmosfera [Physicochemistry and biology of peat. Methods for measuring gas exchange at the soil-atmosphere boundary] / M.V. Glagolev, A.F. Sabrekov, V.S. Kazancev – Tomsk: TGPU, 2010. – 104 p. [in Russian]
3. Bazhin N.M. Metan v atmosfere [Methane in the atmosphere] / N.M. Bazhin // *Sorovskii obrazovatel'nyi zhurnal* [Sorovsky Educational Magazine]. – 2000. – Vol. 6. – № 3. – p. 52-57. [in Russian]
4. IPCC Climate Change, 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – Cambridge ; New York : University Press, 2007. – 1535 p.
5. Le Mer J. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. / J. Le Mer, P. Roger // *European J. Soil Biology*. – 2001. – Vol. 37. – № 1. – p. 25–50.
6. Slobodkin A.I. Obrazovanie i potreblenie metana mikroorganizmami v bolotakh tundri i srednei taigi [Formation and consumption of methane by microorganisms in tundra and middle taiga swamps] / A.I. Slobodkin, N.S. Panikov, G.A. Zavarzin // *Mikrobiologiya* [Microbiology]. – 1992. – Vol. 61. – № 4. – p. 683-695. [in Russian]
7. Bartlett K.B. Methane emissions from tundra environments in the Yukon-Kuskokwim Delta Alaska. / K.B. Bartlett, P.M. Crill, R.L. Sass et al. // *Journal of Geophysical Research D*. – 1992. – Vol. 97. – № 15. – p. 16645-16660.
8. Fan S.M. Micrometeorological measurements of CH₄ and CO₂ exchange between the atmosphere and subarctic tundra. / S.M. Fan, S.C. Wofsy, P.S. Bakwin et al. // *Journal of Geophysical Research D*. – 1992. – Vol. 97, № 15. – p. 16627-16643.
9. Galchenko V.F. Biogeokhimiicheskie protsessy tsikla metana v pochvakh, bolotakh i ozerakh Zapadnoi Sibiri [Biogeochemical processes of the methane cycle in soils, swamps and lakes of Western Siberia] / V.F. Galchenko, L.E. Dulov, B. Kramer et al. // *Mikrobiologiya* [Microbiology]. – 2001. – Vol. 70. – № 2. – p. 215-225. [in Russian]
10. Novikov N.N. Sezonnaya dinamika e'missii SO₂, SN₄, N₂O i NO iz torfyany'x pochv pojmy' r. Yaxroma [Seasonal dynamics of CO₂, CH₄, N₂O and NO emissions from peat soils of the Yakhroma River floodplain]. / N.N. Novikov, A.L. Stepanov, A.I. Pozdnyakov et al. // *Pochvovedenie* [Soil science]. – 2004. – № 7. – p. 867-874. [in Russian]
11. Berestovskaya Yu.Yu. Protsessy obrazovaniya i okisleniya metana v pochvakh zapolyarnoi tundri Rossii [The processes of methane formation and oxidation in the soils of the polar tundra of Russia] / Yu.Yu. Berestovskaya, I.I. Rusanov, L.V. Vasileva et al. // *Mikrobiologiya* [Microbiology]. – 2005. – Vol. 74. – № 2. – p. 261-270. [in Russian]
12. Glagolev M.V. Letne-osennyaya e'missiya dioksida ugleroda metana osushenny'mi torfyanikami, izmenenny'mi pri xozyajstvennom ispol'zovanii, i estestvenny'mi bolotami (na primere uchastka Tomskoj oblasti) [Summer-autumn emission of methane carbon dioxide by drained peat bogs modified during economic use and natural marshes (on the example of the Tomsk region site)]. / M.V. Glagolev, M.V. Chistotin, N.A. Shny'rev et al. // *Agroximiya* [Agrochemistry]. – 2008. – № 5. – p. 46-58. [in Russian]
13. Krivenok L.A. Udelnie potoki metana iz ekosistem yuzhnoi tundri Zapadnoi Sibiri [Specific methane fluxes from ecosystems of the southern tundra of Western Siberia] / L.A. Krivenok, M.V. Glagolev, I.A. Fastovets et al. // *Dinamika okruzhayushchei sredi i globalnie izmeneniya klimata* [Environmental dynamics and global climate change]. – 2014. – Vol. 5. – № 1(9). – p. EDCCr0011. [in Russian]
14. Miglovets M.N. Vertikalnie potoki SN₄ i SO₂ v rastitel'nykh soobshchestvakh mezooligotrofnogo bolota srednei taigi [Vertical flows of CH₄ and CO₂ in plant communities of the mesooligotrophic swamp of the Middle taiga] / M.N. Miglovets, O.A. Mikhailov, S.V. Zagirova // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. – 2014. – Vol. 16. – № 1. – p. 193-197. [in Russian]
15. Krasnov O.A. Monitoring emissii metana i dvoukisi ugleroda iz pochvi v atmosferu i parametri pochvi. Bakcharskoe boloto Tomskoi oblasti (2014 g.) [Monitoring of methane and carbon dioxide emissions from soil into the atmosphere and soil parameters. Bakchar swamp of the Tomsk region (2014)] / O.A. Krasnov, S. Maksyutov, D.K. Davidov et al. // *Optika atmosfery i okeana* [Optics of the atmosphere and ocean]. – 2015. – Vol. 28. – № 7. – p. 644-654. [in Russian]
16. Kon'kova V.M. E'missiya parnikovyx gazov s torfyany'x pochv v usloviyax Brestskoj i Minskoj oblastej [Greenhouse gas emissions from peat soils in the conditions of the Brest and Minsk regions]. / V.M. Kon'kova, A.V. Burlo, I.P. Narkevich // *E'kologicheskij vestnik* [Ecological Bulletin]. – 2016. – № 4 (38). – p. 33-42. [in Russian]
17. Chistotin M.V. Dinamika e'missii metana iz osushennoj torfyanoj pochvy' v zavisimosti ot rastitel'nosti i rezhima uvlazhneniya (rezultaty' vegetacionnogo opyta) [Dynamics of methane emissions from drained peat soil depending on vegetation and moisture regime (results of vegetation experiment)]. / M.V. Chistotin, G.G. Suvorov, A.A. Sirin // *Agroximiya* [Agrochemistry]. – 2016. – № 12. – p. 20–33. [in Russian]
18. Veretennikova Ye.E. Vremennaya izmenchivost emissii metana iz verkhovogo bolota Zapadnoi Sibiri [Temporal variability of methane emissions from the upper swamp of Western Siberia] / Ye.E. Veretennikova, Ye.A. Dyukarev, I.V. Kurina // *Optika atmosfery i okeana* [Optics of the atmosphere and ocean]. – 2022. – Vol. 35. – № 2 (397). – p. 162-167. [in Russian]
19. Nacional'nyj doklad Rossijskoj Federacii o kadastre antropogennykh vybrosov iz istochnikov i absorbcii poglotitelyami parnikovyx gazov, ne reguliruemym Monreal'skim protokolom za 1990–2013 gg. [National Report of the Russian Federation on

the inventory of anthropogenic emissions from sources and removals by sinks of greenhouse gases not regulated by the Montreal Protocol for 1990-2013]. – Moscow : Roshydromet, 2015. – 476 p. [in Russian]

20. Garkusha D.N. Emissiya metana iz pochv Rostovskoi oblasti [Methane emission from the soils of the Rostov region] / D.N. Garkusha, Yu.A. Fedorov, N.S. Tambieva // Aridnie ekosistemi [Arid ecosystems]. – 2011. – Vol. 17. – № 4(49). – p. 44–52. [in Russian]

21. Fedorov Yu.A. Analiticheskii obzor: emissiya i pogloshchenie parnikovikh gazov pochvami. Ekologicheskie problemi [Analytical review: emission and absorption of greenhouse gases by soils. Environmental issues] / Yu.A. Fedorov, V.V. Sukhorukov, R.G. Trubnik // Antropogennaya transformatsiya prirodnoi sredi [Anthropogenic transformation of the natural environment]. – 2021. – Vol. 7. – № 1. – p. 6-34. [in Russian]

22. Ivanov A.L. Global'ny'j klimat i pochvenny'j pokrov – posledstviya dlya zemlepol'zovaniya Rossii [Global climate and soil cover – consequences for land use in Russia]. / A.L. Ivanov, I.Yu. Savin, V.S. Stolbovoj et al. // Byulleten' Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaeva [Bulletin of the V.V. Dokuchaev Soil Institute]. – 2021. – № 107. – p. 5–32. [in Russian]

23. Guidance document 52.24.511-2013. Massovaya dolya metana v donnyh otlozheniyah. Metodika izmerenij gazohromatograficheskim metodom s ispol'zovaniem analiza ravnovesnogo para [The mass fraction of methane in bottom sediments. Measurement technique by gas chromatographic method using equilibrium vapor analysis]. – Rostov-on-Don : Roshydromet, 2013. – 19 p. [In Russian]

24. Gar'kusha D.N. Metan v pochvax razlichny'x geograficheskix zon Rossii [Methane in the soils of various geographical zones of Russia]. / D.N. Gar'kusha, Yu.A. Fedorov, N.S. Tambieva // Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya [News of the Russian Academy of Sciences. Geographical series]. – 2018. – № 3. – p. 47–55. [in Russian]

25. Fedorov Yu.A. Emissiya metana s torfyanih zalezhei Ilasskogo bolotnogo massiva Arkhangel'skoi oblasti [Methane emission from peat deposits of the Ilassky swamp massif of the Arkhangelsk region] / Yu.A. Fedorov, D.N. Garkusha, M.I. Khromov // Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva [News of the Russian Geographical Society]. – 2008. – Vol. 140. – Iss. 5. – p. 40–48. [in Russian]

26. Fedorov Yu.A. E'missiya metana torfyany'mi zalezhami verkhovy'x bolot Pskovskoj oblast [Methane emission from peat deposits of the upper marshes of the Pskov region]. / Yu.A. Fedorov, D.N. Gar'kusha, G.V. Shipkova // Geografiya i prirodny'e resursy' [Geography and natural resources]. – 2015. – № 1. – p. 88–97. [in Russian]

27. Gar'kusha D.N. E'missiya metana trostnikovoj formaciej poberezh'ya Azovskogo morya [Methane emission from the reed formation of the Azov Sea coast]. / D.N. Gar'kusha, Yu.A. Fedorov, V.V. Suxorukov // Voda: ximiya i e'kologiya [Water: chemistry and ecology]. – 2019. – № 3–6. – p. 78–85. [in Russian]

28. Guidance document 52.24.512-2012. Ob'emnaya koncentraciya metana v vodah. Metodika izmerenij gazohromatograficheskim metodom s ispol'zovaniem analiza ravnovesnogo para [The volume concentration of methane in the waters. Measurement technique by gas chromatographic method using equilibrium vapor analysis]. – Rostov-on-Don : Roshydromet, 2012. – 23 p. [in Russian]