

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Казанцев В.С., Кривенок Л.А., Чербунина М.Ю., Котов П.И. — Эмиссия парниковых газов из природных экосистем Норильского промышленного района // Арктика и Антарктика. — 2023. — № 4. — С. 19 - 41. DOI: 10.7256/2453-8922.2023.4.69058 EDN: IHJPRJ URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=69058

Эмиссия парниковых газов из природных экосистем Норильского промышленного района

Казанцев Владимир Сергеевич

ORCID: 0000-0002-0156-0566

кандидат биологических наук

старший научный сотрудник, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

119017, Россия, г. Москва, пер. Пыжевский, 3

✉ kazantsev@ifaran.ru



Кривенок Людмила Алексеевна

ORCID: 0000-0001-8220-6720

младший научный сотрудник, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

119017, Россия, г. Москва, пер. Пыжевский, 3

✉ krivenok@ifaran.ru



Чербунина Мария Юрьевна

ORCID: 0000-0002-6211-7971

кандидат геолого-минералогических наук

младший научный сотрудник, МГУ им. М.В. Ломоносова

119991, Россия, Москва область, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1

✉ cherbuninamariya@gmail.com



Котов Павел Игоревич

ORCID: 0000-0002-5945-3405

кандидат геолого-минералогических наук

директор, Научно-исследовательский центр ЗГУ им. Н.М. Федоровского

663310, Россия, Красноярский край, г. Норильск, ул. 50 лет Октября, 7

✉ KotovPl@norvuz.ru

[Статья из рубрики "Климат Арктики и Антарктики"](#)**DOI:**

10.7256/2453-8922.2023.4.69058

EDN:

Дата направления статьи в редакцию:

21-11-2023

Дата публикации:

21-12-2023

Аннотация: В настоящей работе описаны результаты натурных измерений удельных потоков метана и углекислого газа из естественных и антропогенно-измененных экосистем, расположенных на территории Норильского промышленного района. Ранее подобные исследования на данной территории не проводились. Точки исследования располагаются в различных ландшафтных районах, определяемых по различным условиям формирования толщи многолетнемерзлых пород. Большая часть изучаемой территории располагается в пределах зоны преимущественно сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Выделено 6 ландшафтных районов. Измерения удельных потоков метана и углекислого газа проводились на выбранных типичных для каждого района ключевых участках. При выборе точек проведения исследования принималось во внимание разнообразие условий, влияющих на эмиссии метана и углекислого газа. В первую очередь к ним относится тип почв (минеральные и болотные) и локальные условия увлажнения. Для измерения эмиссий метана и углекислого газа использовался метод темных статических камер. Измерения концентраций парниковых газов в камере проводились поточным газоанализатором Li-7810. Полученные результаты показывают значительную вариабельность эмиссии парниковых газов для различных типов экосистем. На минеральных почвах и сухих участках болотных ландшафтов фиксируется поглощение метана почвами. Положительные значения эмиссии метана характерны для обводнённых участков болотных экосистем и озёр с максимальными значениями в мочажинах. Удельные потоки метана варьируются от слабоотрицательных на сухих участках болот с медианой -0,026 мгСН4/м2/ч до эмиссии в 0,802 мгСН4/м2/ч (медиана для обводненных частей болотных экосистем). Удельные потоки углекислого газа обратно коррелируют с увлажненностью экосистем и имеют разброс значений от 51,6 мгСО2/м2/ч (медиана для озер) до 576 мгСО2/м2/ч (медиана для минеральных почв). Обнаружена средней силы корреляция между температурой приземного слоя воздуха и интенсивностью поглощения метана минеральными почвами. Распределения плотностей вероятности значений удельных потоков метана и углекислого газа имеют разные типы модальностей.

Ключевые слова:

метан, углекислый газ, болота, озера, пресноводные экосистемы, удельные потоки, камерный метод, углеродный баланс, ландшафты, мерзлота

Исследование выполнено при поддержке ЗГУ имени Н.М. Федоровского в рамках мероприятия Программы деятельности научно-образовательного центра мирового уровня «Енисейская Сибирь» ТП 35 «Региональная сеть карбоновых полигонов для

долговременных наблюдений потоков парниковых газов, тепла и влаги».

1. Введение

Актуальные изменения климата, обусловленные в том числе ростом содержания в атмосфере парниковых газов (ПГ), четко фиксируются учеными начиная с середины XIX века. К основным ПГ относятся водяной пар, метан и углекислый газ. Источниками метана и углекислого газа в атмосфере являются как антропогенные, так и природные, среди последних значимую роль играют озера, реки, болота [1]. Одной из актуальных задач современной экологии является инвентаризация источников ПГ в глобальном масштабе. Это необходимо как для адекватной оценки эмиссии ПГ природными и антропогенными источниками, так и для построения и верификации прогнозных моделей эмиссии в условиях изменения климата.

В связи с вышеизложенным особый интерес представляют источники ПГ, которые расположены в арктической зоне, так как именно для этой территории прогнозируется наиболее интенсивное изменение климата, в том числе проявляющееся в виде повышения среднегодовой температуры воздуха. Ожидается, что этот процесс скажется на изменении интенсивности эмиссий ПГ из естественных экосистем Арктики в сторону увеличения в связи с вовлечением в биологический круговорот части запасов органического вещества, которое в настоящее время находится в толще многолетнемерзлых пород.

В целом, российская Арктика до настоящего момента слабо изучена в части инвентаризации источников ПГ в атмосферу. Имеющиеся исследования относятся к относительно небольшому количеству объектов, расположенных на территории арктической части Евразии. В силу логистических сложностей основные точки исследований эмиссий ПГ расположены вблизи населённых пунктов или транспортных коммуникаций и не охватывают широкое разнообразие природных экосистем Арктики. Какие-либо результаты изучения эмиссий ПГ из природных экосистем Норильского промышленного района (НПР) нам не известны.

Из близлежащих регионов со схожими природными условиями в отношении эмиссии ПГ в большей степени изучена северная часть Западной Сибири. В подзоне южной тундры первые исследования эмиссии метана проводились в 1996 г. в период весеннего снеготаяния и в летний период на юге ямальского полуострова [2]. В работах [3-5] описаны результаты изучения естественных пресноводных экосистем южной и северной тундры в районе п. Тазовский Ямало-Ненецкого автономного округа. В рамках исследования [6] проведены полевые измерения эмиссии метана в лесотундровой зоне в 10 км к северу от г. Игарка. Была показана связь потребления атмосферного метана минеральными почвами с распределением многолетнемерзлых пород и режимом влажности почвы, а также отмечена высокая эмиссия из термокарстового озера. Одна из последних работ [7] приводит результаты изучения эмиссии метана из озёр Приполярного Урала и Центрального Ямала. В работе выявлено также влияние скорости ветра на эмиссию CH_4 , и на примере одного озера описана суточная динамика эмиссии метана.

Одними из основных факторов, влияющих на процесс эмиссии метана углекислого газа является влажность и температура почвы [8]. С увеличением влажности болотных и минеральных почв интенсифицируется процесс эмиссии метана и снижается эмиссия углекислого газа из-за смещения равновесия процессов выделения метана и

углекислого газа и поглощения метана бактериями [9]. Температура почвенного субстрата также влияет на процесс эмиссии метана в сторону его интенсификации за счет роста активности метанпродуцирующих бактерий [10].

Целью данного исследования было изучение особенностей эмиссии метана и углекислого газа из естественных экосистем на территории НПР. В связи с этим была поставлена задача провести натурные измерения эмиссии метана и углекислого газа с поверхности природных объектов, оценить влияние природных факторов определения природных факторов, влияющих на эмиссию этих ПГ.

2. Методика

2.1 Ландшафтное районирование

Для выбора расположения точек исследования было проведено предварительное районирование территории по природным условиям, определяющим формирование многолетнемерзлых пород (ММП) района с целью выявить наиболее типичные ландшафты. Исследуемая территория расположена в зоне преимущественно сплошного распространения ММП. Распределение ММП по площади определяется совместным влиянием зональных, региональных и местных факторов теплообмена горных пород с атмосферой, и вследствие большого разнообразия последних, оказывается весьма сложным. При выборе точек для измерения ПГ учитывались площадь распространения района, в котором выделялись наиболее типичные ландшафты, геологическое строение и его геокриологические особенности. Ниже приведена характеристика каждого выделенного района.

Район 1 представляет собой ландшафты долины р. Хараэлах и предгорьев плато Пutorano. Здесь преобладают пологие склоны верхнеплейстоцен-голоценового возраста, где в условиях повышенного увлажнения развиты делювиально-солифлюкционные отложения из дресвы и щебня с суглинистым заполнителем, часто оторфованные. Особенностью этой территории также является наличие вложенных краевых морен в придолинных частях склонов вследствие горно-долинного верхнеплейстоценового оледенения. С геокриологической точки зрения для этого района характерно сплошное распространение ММП мощностью 200–400 м и самые низкие температуры пород от –2 до –5 °C [11–12].

Район 2 занимает обширную территорию и расположен на широко распространенной поверхности озёрно-ледниковой верхнеплейстоценовой низменности, которая относится к геоморфологическому уровню Вальковской равнины, сложенной толщей алевритов, ленточных глин, илов. Ее образование связано с осушением Вальковского ледникового пресноводного водоема, который исчез во время голоценового оптимума. В литературе чаще обозначают эту поверхность как Вальковскую озерно-аллювиальную равнину или террасу, тогда как на карте четвертичных отложений [13] оно обозначена как озерно-ледниковая [13–14]. Для района характерен бугристо-западинный рельеф, чрезвычайно расчлененный, связанный с активным развитием термокарста по сильнольдистым отложениям и наличием большого количества сегрегационно-инъекционных бугров пучения [15]. Здесь наблюдается прерывистое распространение ММП мощностью 40–80 м, с мягкими температурными условиями – среднегодовыми температурами пород от 0 до –2 °C.

Район 3 расположен у р. Норильская в месте впадения р. Валек, которая является ее правым притоком (относится к Рыбинско-Норильской долине). Расположение здесь

района позволяет охарактеризовать ландшафтно-геокриологические условия территории, на которые оказывает влияние река. Здесь выделяются поверхности русла поймы и террасы р. Норильской, старица р. Валек, вероятно, голоценового возраста, сложенные слоистой толщей песчаного алевритового состава с включениями растительных детритов. Слоистые террасы покрыты лиственнично-елово-березовым лесом с кустарничком, пойма –растительностью в виде разнотравья с кустами ивы. Здесь характерно прерывистое распространение ММП мощностью 40–80 м со среднегодовыми температурами пород от 0 до -21 . Для старицных отложений и прирусловых в долине р. Норильская отмечаются отдельные острова мерзлоты с температурами от 1 до -1 $^{\circ}\text{C}$.

Район 4 расположен в районе Оганера в техногенно-трансформированном ландшафте (также относится к Рыбининско-Норильской долине). Здесь, по сравнению с районом 3, происходит замещение первоначальных лесов на кустарниковую тундру вследствие аэро-техногенного воздействия от горно-металлургического комбината [\[16\]](#). В районе широко распространены полигоны вытаивающих повторно-жильных льдов (ПЖЛ) и приуроченный к ним процесс заболачивания. Один из самых больших районов по площади в исследуемом регионе.

Район 5 расположен недалеко от пос. Алыкель на озерно-ледниковой низменности, отложения сложены толщей алевритов, ленточных глин, илов. Поверхность сильно заболочена и заозёрана (встречается большое количество озер преимущественно округлой формы). Сложные очертания озёр, характер их береговой линии (наличие низких отрезков с зарастающими частями озёр и крутые обрывистые берега) указывает на их термокарстовое происхождение. Для ММП выделяется достаточно широкий диапазон температур от -1 до -5 $^{\circ}\text{C}$ при мощности 60–120 м.

Район 6 относится к Приенисейской позднеплейстоценовой ледниковой аккумулятивной поверхности, сложенной суглинистыми моренными отложениями. Заозеренный, включает мерзлотные формы рельефа, из которых можно выделить системы ПЖЛ и эрозионно-термокарстовые котловины. Относится к южной тундре, с характерными кустарниковыми сообществами различных видов ив, которые формируются в условиях обильного увлажнения (в долинах рек и по понижениям рельефа на водоразделе), реже встречаются осоково-пушицевые кочкарники. Здесь характерны мощности ММП около 60–120 м. Узким диапазоном невысоких отрицательных температур от -1 до -2 $^{\circ}\text{C}$ ММП характеризуются поверхности под плоскими, часто заболоченными, кочковатыми кустарниками и кустарниковыми тундрами. Такая стабильность температурных условий объясняется практически плоским рельефом поверхности и преобладающим моховым напочвенным покровом.

2.2. Объекты исследования

Исследования удельных потоков (УП) метана и углекислого газа проводились на территории Норильского промышленного района 3–8 июля 2023 года. Расположение точек, в которых измерялись УП, представлена на рисунке 1, координаты и описание точек – в таблице 1. Болотные экосистемы классифицировались согласно [\[17\]](#).

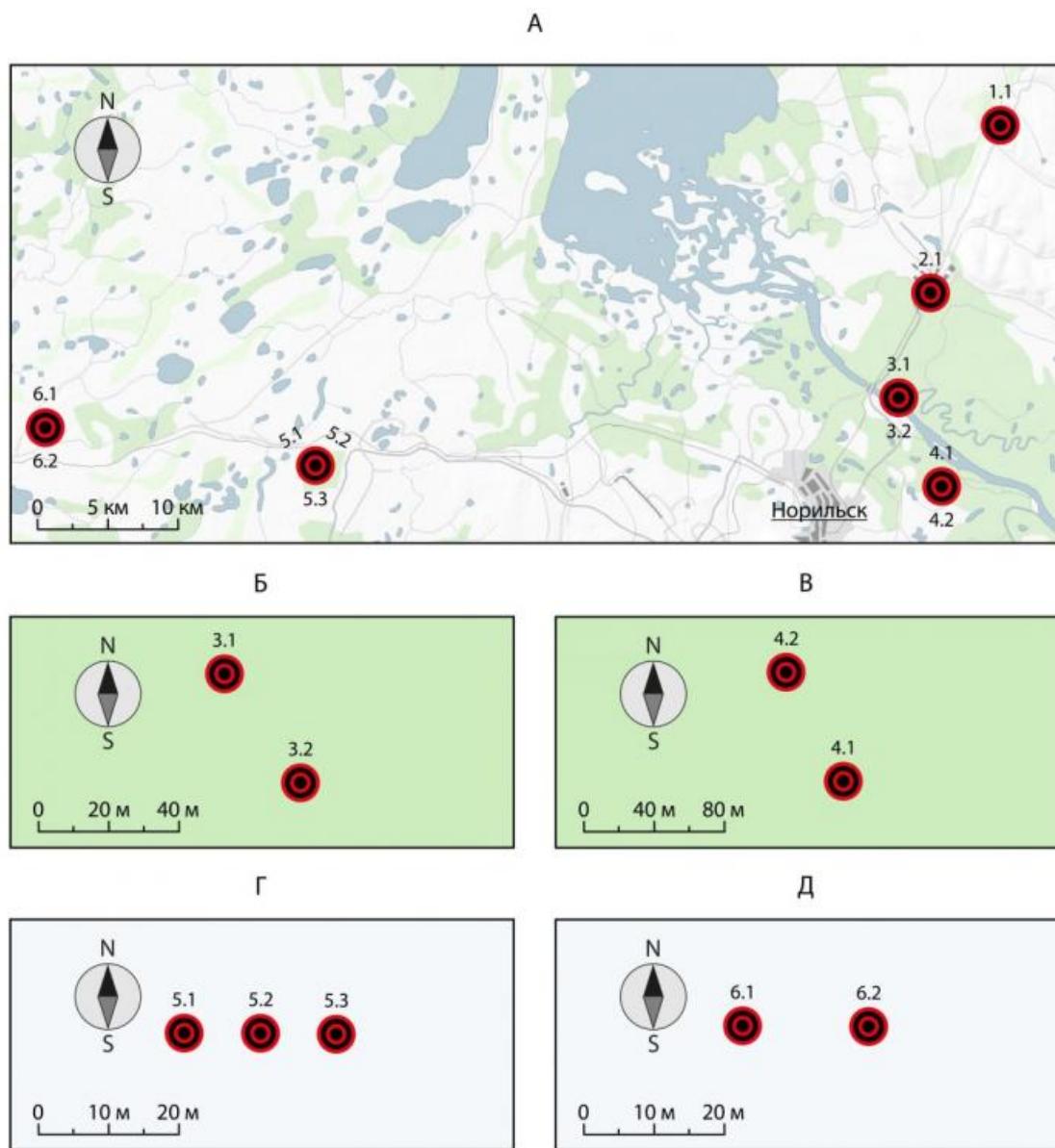
Рисунок 1. Схема расположения точек исследования эмиссии CH_4 и CO_2 .

Таблица 1. Характеристики точек измерения эмиссии ПГ

Ландшафтный район / Точка измерения УП	Координаты, °		Тип экосистемы	Сезонно-тальный слой		ММП
	С.Ш.	В.Д.		состав	весовая влажность, д.е/мощность, м	
1 / 1.1	69,57826	88,53435	Минеральная почва под кустарничниковым сообществом на горном склоне	суглинок	0,60/0,35	сплошное
			Минеральная			

Ландшафтный район / Точка измерения УП	Координаты, °		Тип экосистемы	Сезонно-состав	Суглиночный слой 0,44/0,64 весовая влажность, д.е/мощность, м	прерывистое ММП
	С.Ш.	В.Д.				
2 / 2.1	69,47509	88,40497	почва под лесным сообществом			
3 / 3.1	69,40897	88,35328	Минеральная почва под лесным сообществом на склоне I надпойменной террасы	отсутствует		Заглубленная кровля
3 / 3.2	69,40865	88,35394	Обводненная заторфованная речная старица			талик
4 / 4.1	69,35421	88,41659	Озеро в крупнобугристом топяно-озерковом комплексе	отсутствует		талик
4 / 4.2	69,35459	88,41574	Бугор в крупнобугристом топяно-озерковом комплексе	торф	0,20,30	прерывистое
5 / 5.1	69,36852	87,30623	Бугор в полигональном бугристо-озерковом комплексе	суглиночный	0,29/0,48	
5 / 5.2	69,36858	87,30634	Озерко в полигональном бугристо-озерковом комплексе.	отсутствует		сплошное
5 / 5.3	69,36853	87,30657	Мочажина в полигональном бугристо-озерковом комплексе	суглиночный оторфованный	- /0,69	
6 / 6.1	69,39318	86,81725	Бугор в плоскобугристо-топяном комплексе	суглиночный	0,29/0,47	сплошное
6 / 6.2	69,39305	86,81768	Топкая мочажина в плоскобугристо-топяном комплексе	суглиночный	- /0,68	

Все точки также были сгруппированы в зависимости от типа экосистемы (с фокусировкой на степень увлажненности) следующим образом.

I. Расположенные на минеральных хорошо дренированных почвах (точки 1.1, 2.1 и 3.1, рис. 2 А-В).

Точка 1.1 находится в предгорье плато Пutorана вблизи рудника Скалистый на слабонаклоненной относительно ровной поверхности, осложненной деятельностью временных водотоков, а также наличием крупнообломочного материала обвалов и осыпей. Микрорельеф поверхности мелкобугристый. Размер бугров в среднем $1,5 \times 1,5$ м, в высоту до 0,2 м.

Точка 2.1 расположена на слабонаклоненной слабоувлажнённой поверхности (угол наклона 3–5°) на минеральной почве.

Точка 3.1 располагается на склоне I надпойменной террасы р. Валек на слабонаклоненной поверхности (угол наклона 3–5°). Поверхность мелкобугристая, размеры бугров от $0,1 \times 0,1$ до $0,8 \times 0,9$ м.

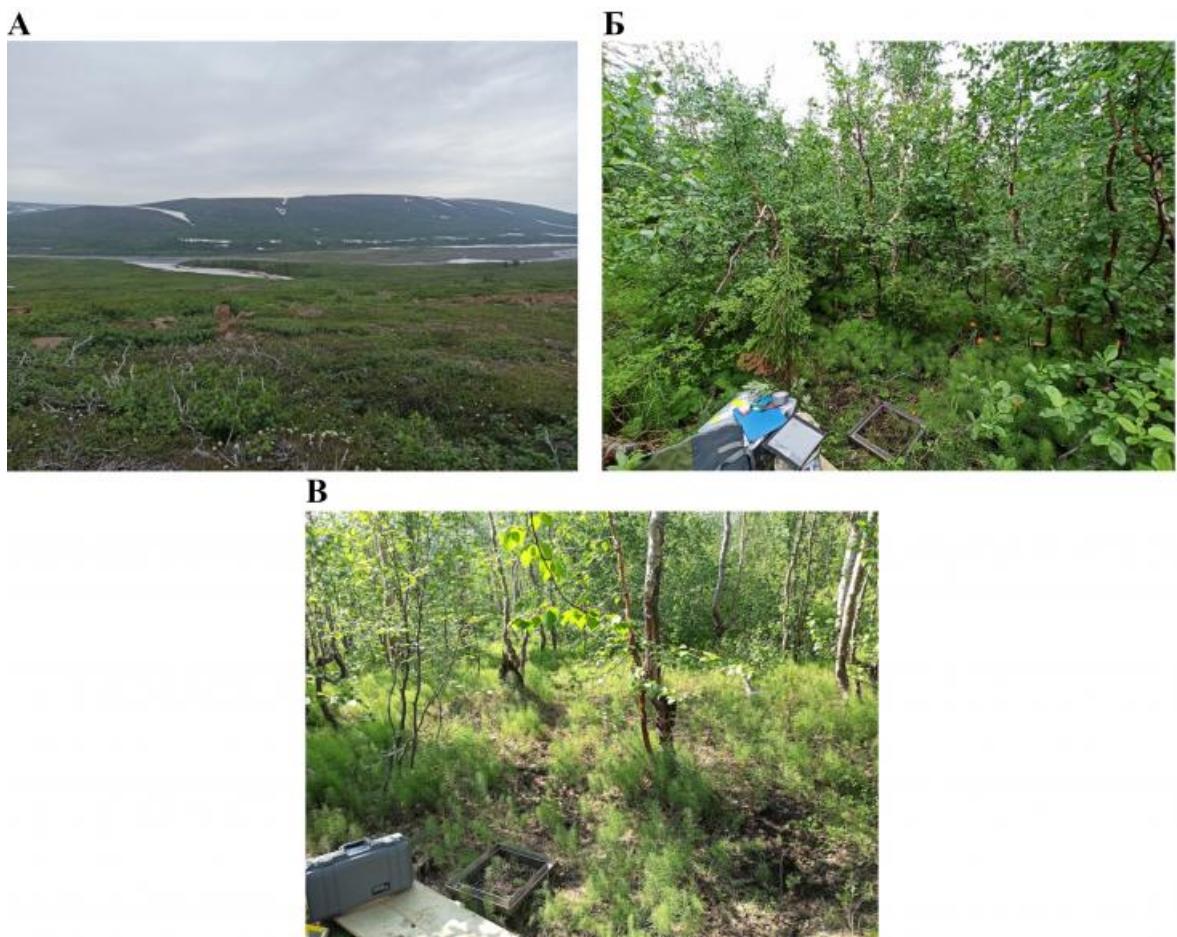


Рисунок 2. Точки А – 1.1, Б – 2.1, В – 3.1

II. Сухие участки болотных экосистем (точки 4.2, 5.1 и 6.1, рис. 3 А-В).

Точка 4.2 находится на слабодренированном заболоченном участке Вальковской равнины. Поверхность участка бугристо-западинная, размеры бугров варьируются от 4 x 4 до 10×15 м.

Измерения УП ПГ проведены на бугре в крупнобугристом топяно-озерковом комплексе.

Точка 5.1 находится в Вальковской равнине в заторфованной низине. Рельеф поверхности мелкобугристый, представлен сухими буграми и влажными мочажинами. Размеры бугров варьируются от $1,3 \times 1,3$ м до 3×7 м, между ними встречаются

микроозерки размером до 3–5 м. Вся исследовательская площадка 5 расположена в полигональном бугристо-озерковом болоте, измерения на точке 5.1 охватывают бугор.

Точка 6.1 расположена на Вальковской равнине в осушенней озерной котловине. Рельеф поверхности мелкобугристый, представлен сухими буграми и влажными мочажинами. Размеры бугров варьируются от 0,3 x 0,3 м до 1 x 0,4 м. Развиваются процессы заболачивания и термокарста. Статическая камера установлена на бугре в плоскобугристо-топяном комплексе.

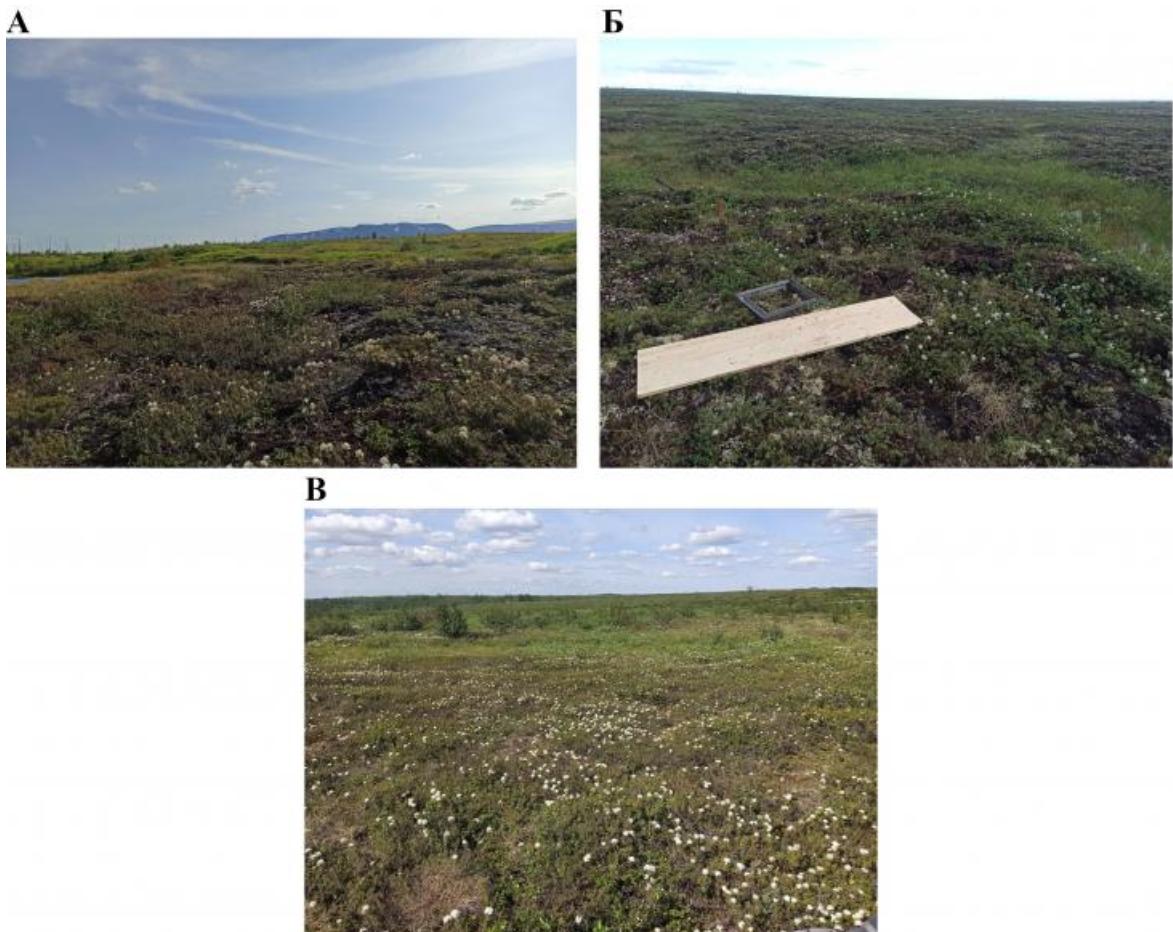


Рисунок 3. Точки А – 4.2, Б – 5.1, В – 6.1

III. Обводненные участки болотных экосистем (точки 3.2, 5.3 и 6.2, рис. 4 А-В).

Точка 3.2 расположена в старице р. Валек на плоской ровной заболоченной переувлажненной поверхности примерно в 40 м от точки 3.1. Уровень болотных вод (УБВ) на участке в среднем 20–30 см над поверхностью. Камера устанавливалась на заболоченную обводнённую речную старицу, УБВ в камере - 8 см над поверхностью.

Точка 5.3 находится на удалении около 15 м от точки 5.1 в мочажине, УБВ 0 см.

Точка 6.2 находится примерно в 50 м от точки 6.1 также в осушенней озерной котловине (см. соответствующее описание). Статическая камера установлена в топкой мочажине плоскобугристо-топяного комплекса с УБВ 0 см.

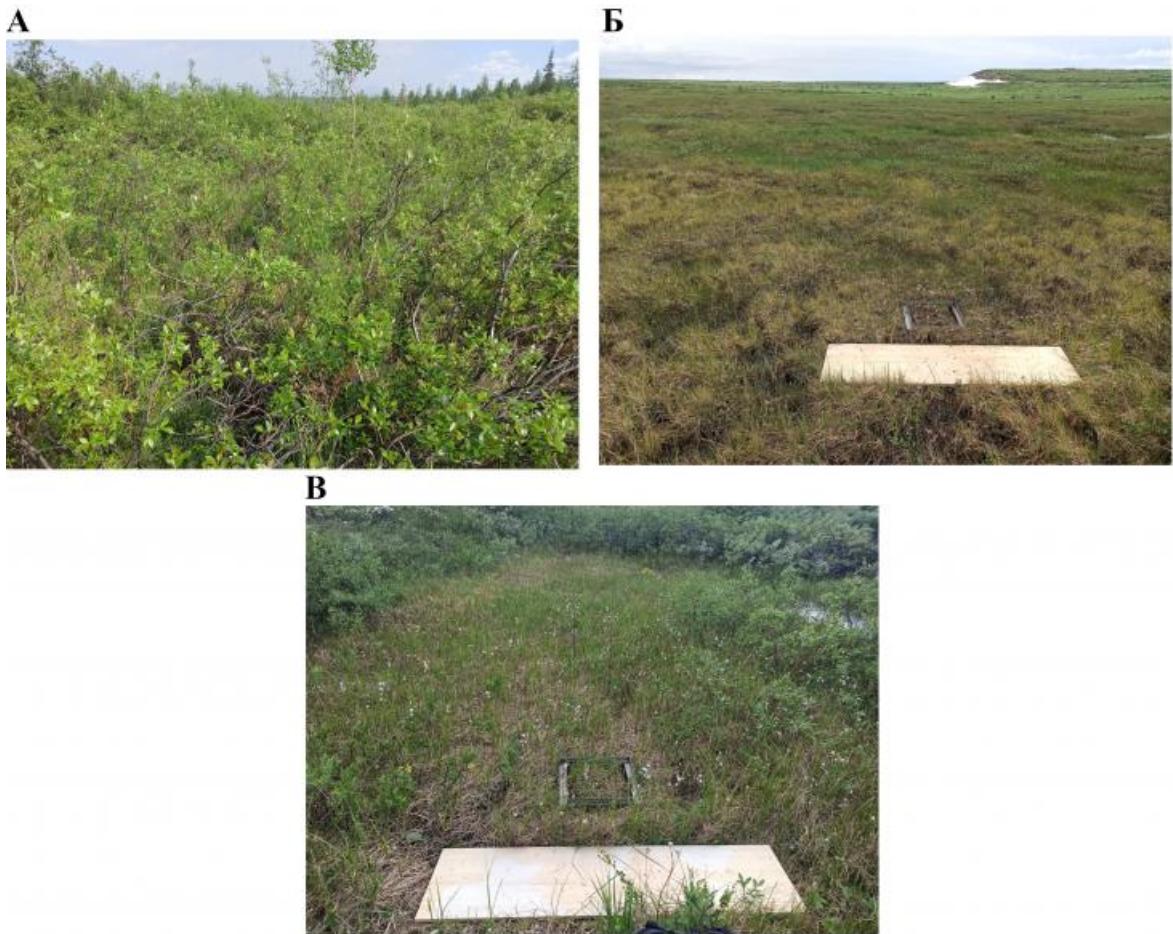


Рисунок 4. Точки А – 3.2, Б – 5.3, В – 6.2

IV. Водные экосистемы (озеро 4.1 и озерко 5.2, рис. 5 А-Б).

Точка 4.1 расположена примерно в 100 м от точки 4.2. Измерения велись с поверхности озера в точке с глубиной 2 м, на поверхности наблюдалось поднятие пузырей (в камеру не попадали, т.к. в процессе измерений резкие скачки концентраций не были замечены).

Точка 5.2 находится на удалении около 15 м от точки 5.1 и представляет собой озерко диаметром около 5 м около глубиной 10 см. Непосредственно в камере находились редкие стебли осоки.



Рисунок 5. Точки А – 4.1, Б – 5.2

2.3. Методика полевых измерений и обработки данных

Измерения удельных потоков ПГ проводились методом ручных статических камер с водяным замком [18–19], для исследования водных экосистем применялась темные плавающие камеры [20] (рис. 6 А–Б). Метод является относительно простым в исполнении и широко используется для измерений эмиссий ПГ с поверхности природных и антропогенно-измененных экосистем. Размер наземной камеры составлял 40x40x30 см, площадь основания — 36x36 см. Объёмы двух используемых плавающих камер — 8,2 л и 7,8 л, площади — 0,0082 м² и 0,0095 м² соответственно. В наземных камерах внутри монтировался вентилятор для гомогенизации воздуха, внутри водной камеры вентилятор не устанавливался ввиду её небольшого объема (т.к. прокачка воздуха непрерывно шла через газоанализатор).

Концентрации метана и углекислого газа в камере определялись портативным газоанализатором LI-COR LI-7810 (LI-COR, США). Газоанализатор герметично подсоединялся к камере двумя трубками на вход и выход. Концентрации метана и углекислого газа определялись с частотой 1 раз в секунду. Время экспозиции — 4–5 минут, на каждой точке делалось от 8 до 12 измерений УП. Параллельно каждому измерению делались замеры свойств приземного слоя атмосферы: температура воздуха, атмосферное давление, скорость ветра. Эти параметры определялись ручной метеостанцией Kestrel 5500 (Nielsen-Kellerman, США).

Всего в 11 точках наблюдений было проведено 106 измерений УП метана и углекислого газа.

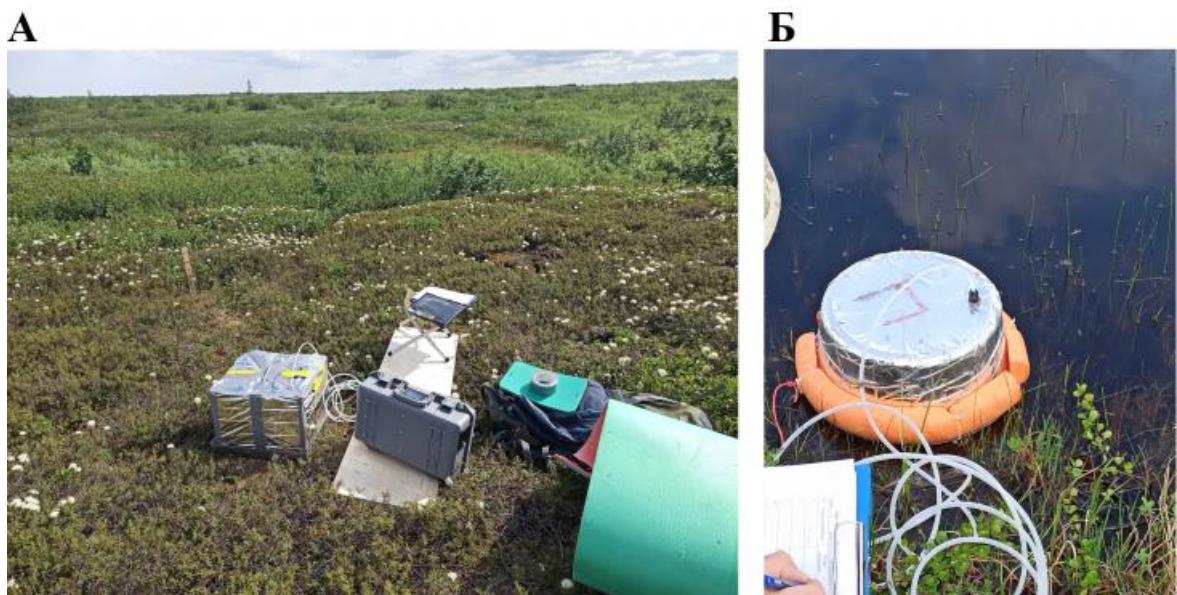


Рисунок 6. А – Статическая камера, Б – плавающая камера.

Значения удельных потоков метана и углекислого газа рассчитывались при помощи аппроксимации измеренных значений (в координатах время-концентрация) линейной регрессией [21]. Статистическая обработка данных осуществлялась в программной среде R 4.3.1. Восстановление плотностей вероятности было проведено непараметрическим ядерным методом при помощи функции *density* с определением оптимальной ширины окна методом Sheather & Jones (1991).

3. Результаты измерений

В таблице 2 отображены результаты измерений УП метана и углекислого газа и метеорологических параметров. Статистические характеристики полученных УП метана и

углекислого газа отражены на рис. 7 А-Б.

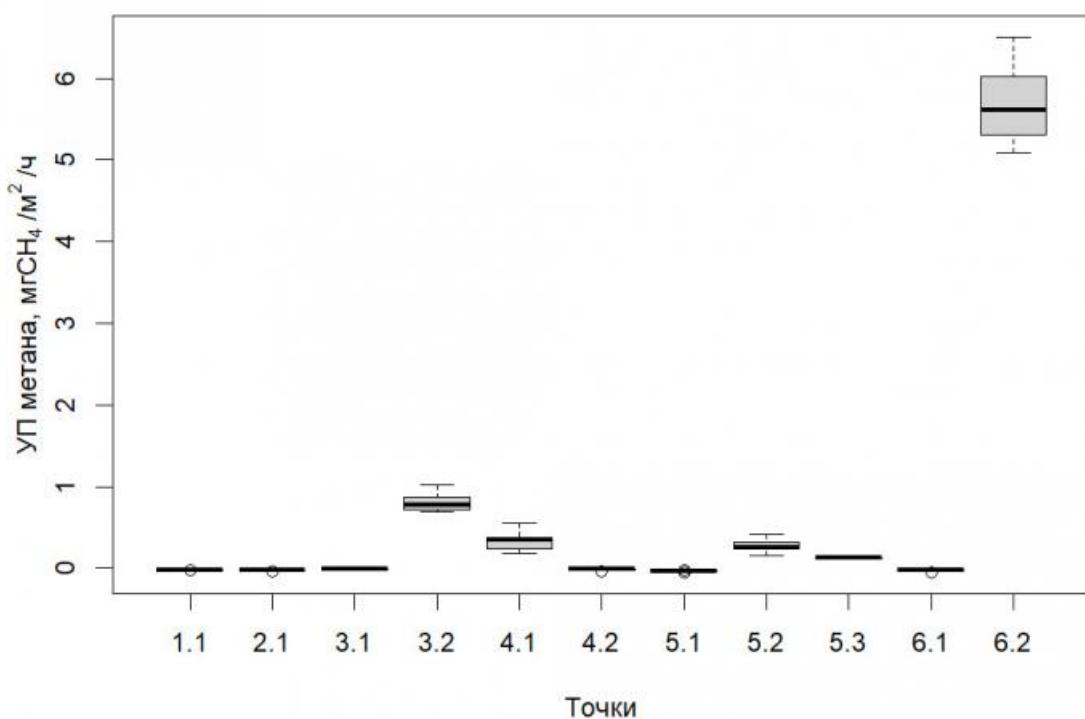
Таблица 2. Результаты измерений УП метана и углекислого газа

Точка	УП метана, мгCH ₄ /м ² /ч	УП углекислого газа, мгCO ₂ /м ² /ч	Скорость ветра, м/с	Давление, гПа	Температура воздуха, °С
1.1	-0,029	352,2	4,3	981,4	19,3
1.1	-0,026	326,9	4,8	981,3	19,5
1.1	-0,031	374,8	3,3	981,3	19,7
1.1	-0,032	377,1	3,1	981,2	19,7
1.1	-0,028	300,0	3,5	981,1	19,5
1.1	-0,022	302,0	3,5	980,7	20,0
1.1	-0,019	280,8	5,0	980,6	19,6
1.1	-0,027	299,2	4,2	980,6	19,7
1.1	-0,026	305,7	4,5	980,6	19,4
1.1	-0,027	290,7	4,0	980,6	19,6
2.1	-0,034	966,8	0,0	998,7	24,6
2.1	-0,027	998,2	0,0	998,6	24,2
2.1	-0,024	996,8	0,2	998,7	24,0
2.1	-0,021	940,9	0,0	998,6	23,9
2.1	-0,021	927,4	0,0	998,4	24,6
2.1	-0,021	945,1	0,0	998,4	24,4
2.1	-0,021	906,1	0,0	998,4	24,1
2.1	-0,020	915,7	0,0	998,4	23,7
2.1	-0,020	897,2	0,0	998,4	24,0
2.1	-0,020	877,1	0,0	998,5	25,0
3.1	-0,016	693,5	0,0	1006,7	25,6
3.1	-0,010	691,5	0,0	1006,8	25,6
3.1	-0,003	569,7	0,0	1006,8	26,0
3.1	-0,005	582,5	0,0	1006,8	26,2
3.1	-0,004	590,5	0,0	1006,8	26,0
3.1	-0,001	545,9	0,0	1006,8	26,0
3.1	-0,003	555,8	0,5	1006,9	26,3
3.1	-0,007	573,3	0,0	1006,8	26,1
3.1	-0,012	544,8	0,0	1006,8	26,3
3.1	-0,001	564,2	0,0	1006,8	26,8
3.1	-0,004	552,4	0,0	1006,7	26,5
3.1	-0,003	554,8	0,5	1006,7	24,6
3.2	0,874	349,4	0,0	1006,5	28,2
3.2	0,975	395,3	0,5	1006,6	27,5
3.2	1,015	409,9	0,0	1006,6	28,8
3.2	0,769	309,3	0,8	1006,5	28,5
3.2	0,775	330,6	0,5	1006,5	28,0
3.2	0,704	282,6	1,4	1006,5	29,2
3.2	0,697	285,8	1,0	1006,5	28,2
3.2	0,828	332,8	0,0	1006,5	28,2
3.2	0,745	310,1	0,5	1006,5	28,4
3.2	0,726	301,6	0,3	1006,5	27,2
4.1	0,236	36,4	0,7	1009,2	25,5

...	...,--	...,.	...,	...,--	...,--
4.1	0,334	46,9	0,8	1009,2	24,8
4.1	0,381	50,2	0,6	1009,2	26,2
4.1	0,183	24,9	0,3	1009,3	23,5
4.1	0,352	46,0	0,4	1009,3	27,4
4.1	0,283	38,5	0,6	1009,3	24,1
4.1	0,553	69,2	0,7	1009,2	24,5
4.1	0,193	26,7	0,4	1009,2	25,4
4.1	0,377	42,2	1,0	1009,2	25,2
4.1	0,429	57,1	1,0	1009,2	23,9
4.2	-0,033	431,5	2,5	1004,9	24,9
4.2	-0,023	407,8	2,5	1004,9	24,5
4.2	-0,018	381,7	1,9	1004,9	24,9
4.2	-0,014	357,7	2,3	1004,9	24,8
4.2	-0,013	381,4	2,5	1005,0	25,3
4.2	-0,013	366,3	2,7	1005,0	24,8
4.2	-0,014	358,5	1,1	1004,9	24,6
4.2	-0,013	352,2	1,1	1005,0	24,4
4.2	-0,014	345,8	2,1	1004,9	24,2
4.2	-0,014	348,5	1,3	1004,9	23,8
5.1	-0,044	501,0	1,6	999,7	17,2
5.1	-0,033	447,7	1,3	997,5	16,7
5.1	-0,032	414,3	1,3	997,5	18,4
5.1	-0,030	395,5	1,9	998,6	18,2
5.1	-0,030	409,3	1,8	999,4	18,2
5.1	-0,031	424,1	1,5	999,2	18,3
5.1	-0,030	417,2	2,5	999,0	20,1
5.1	-0,026	417,4	3,3	999,1	19,0
5.1	-0,031	420,9	1,1	999,1	17,7
5.1	-0,030	392,8	2,9	999,2	17,2
5.2	0,344	64,3	0,4	999,2	19,3
5.2	0,300	76,2	0,8	999,2	19,2
5.2	0,250	61,0	2,6	999,2	17,9
5.2	0,157	46,0	1,9	999,1	19,9
5.2	0,419	67,3	2,6	999,1	18,6
5.2	0,256	62,3	1,3	999,1	19,2
5.2	0,215	54,2	1,5	999,1	19,4
5.2	0,252	53,0	2,8	999,1	19,7
5.3	0,138	261,5	3,6	999,1	19,0
5.3	0,135	312,1	2,3	999,1	18,6
5.3	0,132	329,4	2,0	999,0	18,7
5.3	0,129	305,3	0,6	998,9	18,9
5.3	0,128	284,8	2,6	998,9	18,3
5.3	0,126	270,4	2,6	999,1	18,2
5.3	0,126	282,7	2,4	999,1	18,0
5.3	0,126	296,4	1,3	999,0	18,2
6.1	-0,044	597,7	1,1	1004,8	27,2
6.1	-0,028	548,1	1,8	1004,8	24,0
6.1	-0,026	527,8	1,1	1004,7	26,5

6.1	-0,022	497,0	1,0	1004,7	25,0
6.1	-0,022	495,5	0,0	1004,7	25,4
6.1	-0,027	524,4	1,6	1004,6	24,7
6.1	-0,023	500,9	1,7	1004,7	23,3
6.1	-0,020	435,3	1,7	1004,7	26,7
6.2	5,086	675,0	1,2	1004,8	24,2
6.2	5,084	710,5	0,7	1004,9	23,9
6.2	5,454	737,3	0,8	1004,9	25,0
6.2	5,304	735,6	0,6	1004,8	23,9
6.2	5,930	766,1	1,2	1004,8	24,0
6.2	6,500	799,0	0,0	1004,8	25,5
6.2	6,509	838,3	0,0	1004,8	28,9
6.2	6,027	789,8	1,1	1004,7	27,3
6.2	5,772	866,7	0,7	1004,7	26,2
6.2	5,458	830,5	1,2	1004,7	25,4

А



Б

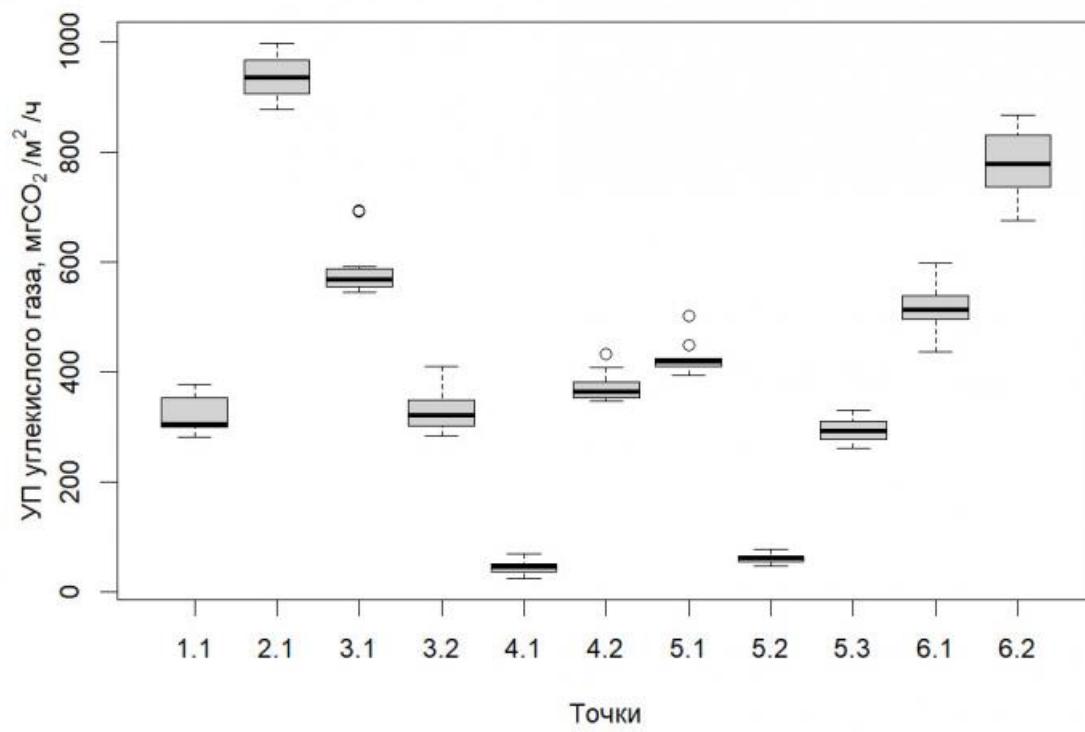


Рисунок 7. Статистические характеристики удельных потоков метана (А) и углекислого газа (Б), измеренных в результате полевых работ 2023 г. (на диаграмме обозначены: линия внутри ящика – медиана, границы ящика – нижний и верхний квартиль, усы – минимум и максимум, круглый маркер – выбросы)

Обнаружена средняя корреляция ($R^2=0,57$) УП метана с поверхности минеральных почв с температурой воздуха (рис. 8). Предполагаем, что это может быть связано с

изменением соотношения активности метаногенов и метаноторфов в почве в сторону снижения роли процесса аэробной метанотрофии.

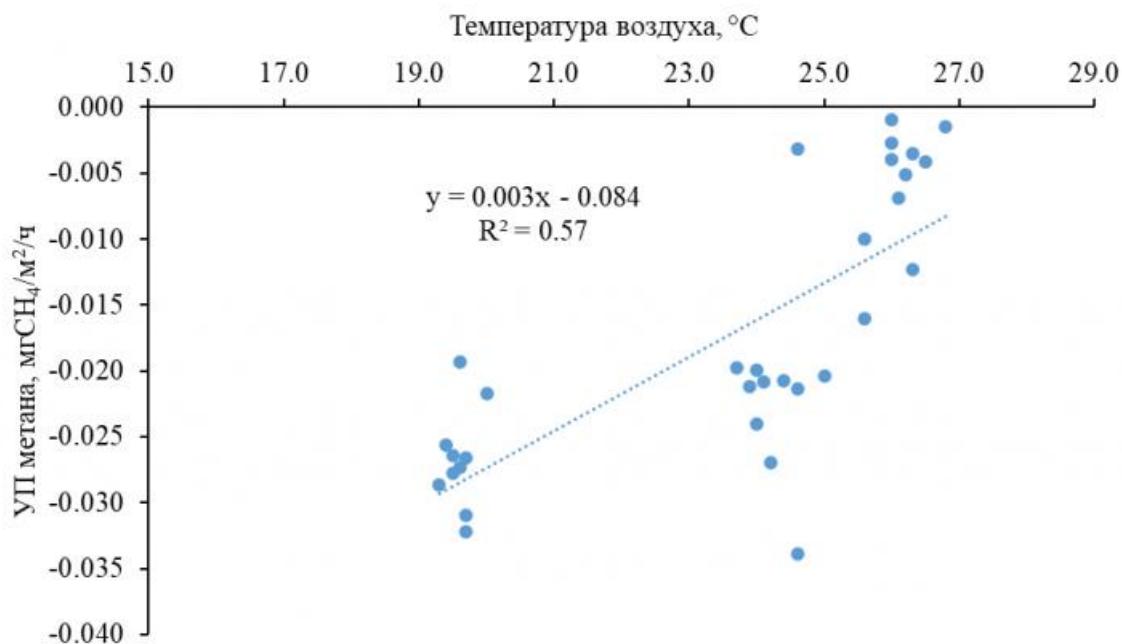
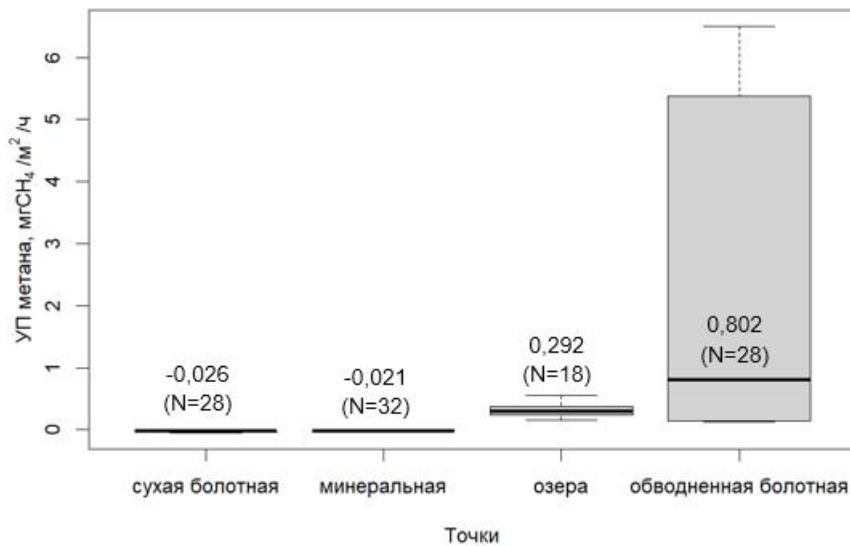


Рисунок 8. Зависимость удельных потоков метана из минеральных почв от температуры воздуха.

Полученные результаты указывают на значительное влияние условий увлажнения на интенсивность эмиссии метана (рис. 9 А). Для сухих минеральных почв, так же как и для хорошо аэрированных возвышенных частей болотных комплексов, характерны слабоотрицательные значения УП метана, что означает процесс поглощения атмосферного метана указанными экосистемами. Эмиссия метана в атмосферу отмечается с поверхности водных и увлажненных болотных экосистем. Максимальное зафиксированное значение эмиссии метана – 6,5 $\text{мгCH}_4/\text{м}^2/\text{ч}$ с поверхности увлажнённой мочажины в точке 6.2.

Условия увлажнения оказывают заметное влияние также и на процесс эмиссии углекислого газа (рис. 9 Б). Минимальные значения эмиссии CO_2 характерны для увлажнённых участков с интенсификацией процесса выделения углекислого газа в атмосферу с поверхности сухих участков экосистем. Так, максимальный измеренный УП CO_2 составляет 998,2 $\text{мгCO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$ с поверхности минеральной почвы в точке 2.1. Минимальный УП 27,6 $\text{мгCO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$ зафиксирован с поверхности внутриболотного озера на точке 4.1. Исключением из этой закономерности является увлажнённая болотная мочажина в точке 6.2. Медиана значений измеренных УП углекислого газа для этой точки наблюдений составляет 777,9 $\text{мгCO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$.

А



Б

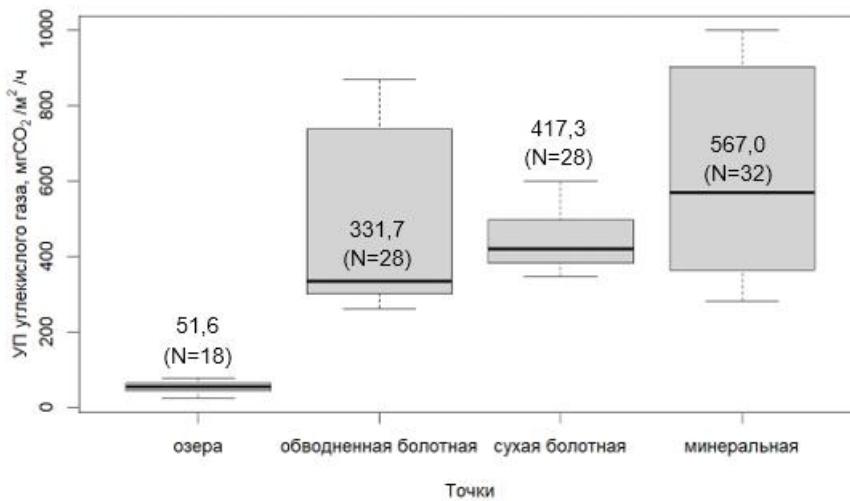


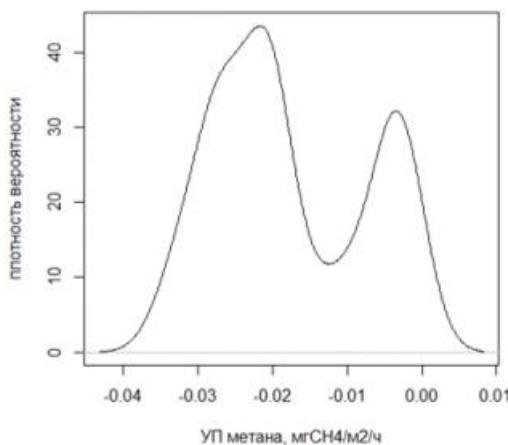
Рисунок 9. Статистические характеристики удельных потоков метана (А) и углекислого газа (Б), измеренных в результате полевых работ 2023 г., с группировкой по степени увлажненности экосистемы (на диаграмме обозначены: числовое значение – медиана, N – объем выборки, линия внутри ящика – медиана, границы ящика – нижний и верхний quartиль, усы – минимум и максимум, круглый маркер – выбросы; группы на графике расположены по увеличению медианы)

Максимальную эмиссию метана с поверхности болотных мочажин можно объяснить хорошим прогревом поверхностного слоя увлажненного болота и наличием большого количества питательных веществ для метаногенов. Сочетание этих условий способствует интенсификации процесса метаногенеза. Также продуцируемый CH_4 до выхода в атмосферу проходит относительно небольшой слой окисления метана. В связи с этим небольшую эмиссию метана с поверхности озера можно объяснить слабым прогревом донных отложений, где происходит процесс генерации метана и частичным окислением выделившегося со дна метана при прохождении через водную толщу озера со дна до поверхности. Рост медианных значений УП углекислого газа заметен по мере снижения влажности экосистем. Это объясняется тем, что продуцирующие углекислый газ

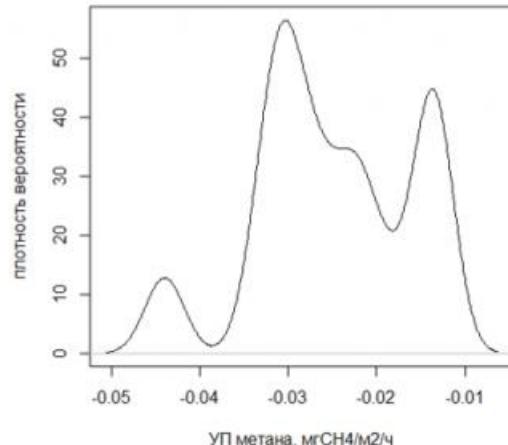
микроорганизмы находятся в таких экосистемах в наиболее благоприятных для себя условиях.

На рисунках 10–11 А–Г приведены распределения плотностей вероятности измеренных УП метана и углекислого газа. Заметно, что все распределения полимодальные (имеют несколько максимумов), за исключением близких к нормальному наблюдаемых распределений УП ПГ из водных экосистем.

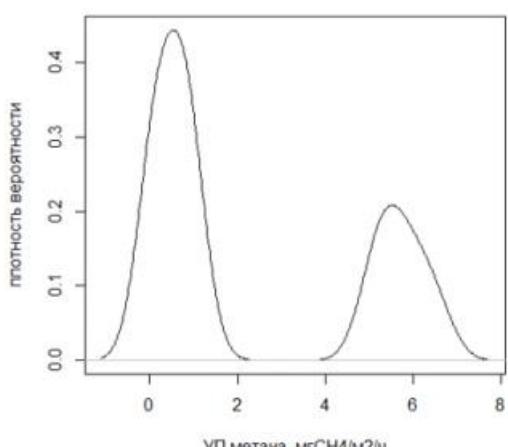
А



Б



В



Г

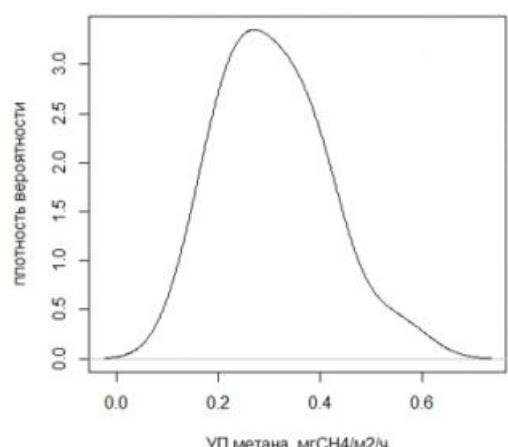


Рисунок 10. Распределения плотностей вероятности УП метана для: А – участков на минеральных почвах, Б – сухих участков болотных экосистем, В – обводненных участков болотных экосистем, Г – водных экосистем.

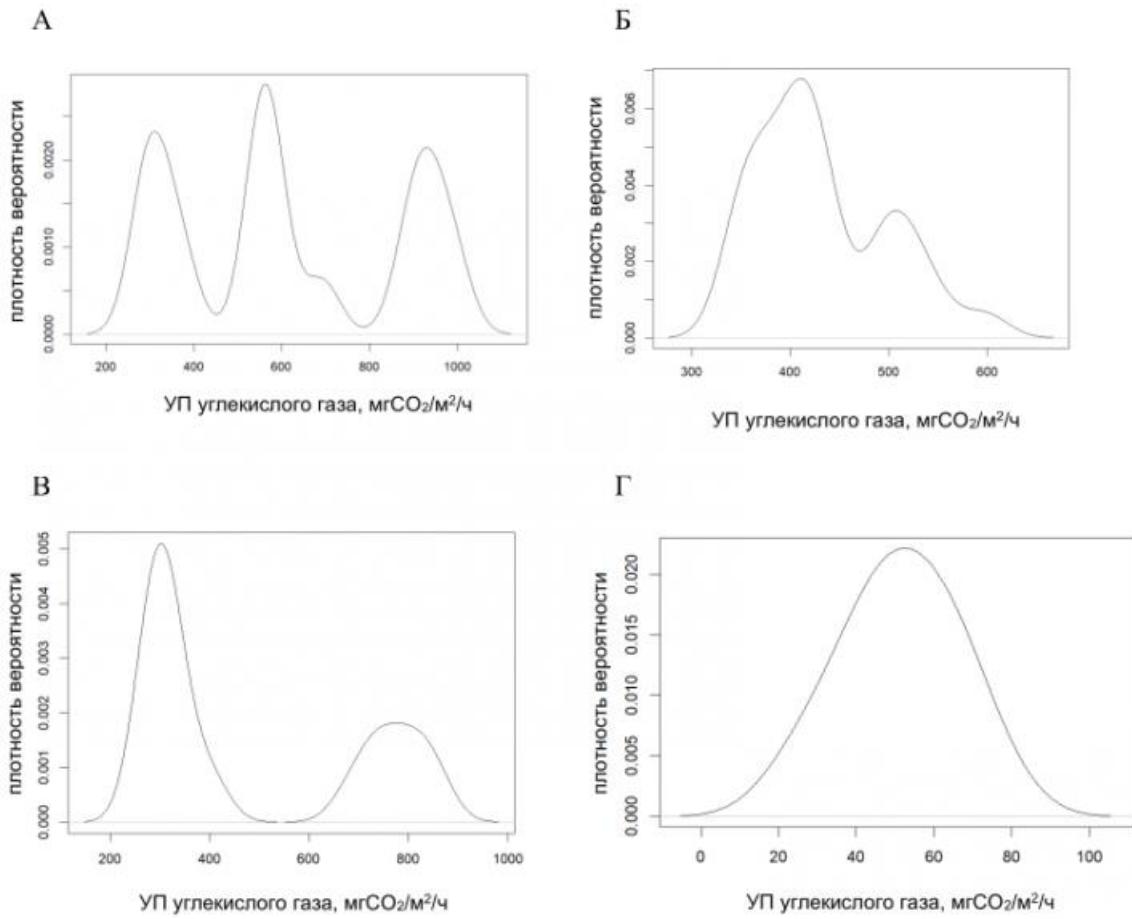


Рисунок 11. Распределения плотностей вероятности УП CO_2 для: А – участков на минеральных почвах, Б – сухих участков болотных экосистем, В – обводненных участков болотных экосистем, Г – водных экосистем.

Полученные в данной работе данные хорошо согласуются с результатами исследований, проведённых в схожих природных условиях на аналогичных элементах естественных экосистем. Эмиссия метана из озёр в пределах НПР характеризуется значениями медиан $0,34 \text{ mgCH}_4/\text{m}^2/\text{ч}$ для точки 4.1 и $0,25 \text{ mgCH}_4/\text{m}^2/\text{ч}$ для точки 5.2. Эти результаты попадают в диапазон между медианами измеренных значений УП метана с поверхности тундровых озёр для двух ключевых участков в южной тундре Западной Сибири «Ясавэй» и «Тазовский» [4], которые равны $0,37 \text{ mgCH}_4/\text{m}^2/\text{ч}$ и $1,14 \text{ mgCH}_4/\text{m}^2/\text{ч}$ соответственно. Но при этом медианы значений УП метана изученных озёр на территории НПР больше, нежели аналогичные показатели эмиссии из озёр стационара Васькины Дачи в типичной тундре Ямала. Для изученных там 6 озер характерны медианы значений УПМ в диапазоне от $0,03$ – $0,34 \text{ mgCH}_4/\text{m}^2/\text{ч}$. В районе точки «Ясавэй» также проводились измерения эмиссии CO_2 с поверхности озёр в летний период 2016 года [5]. В данной работе приведено среднее значение эмиссии равное $79,4 \text{ mgCO}_2/\text{m}^2/\text{ч}$, что превышает среднее значение УП CO_2 , измеренные на точках 4.1 и 5.2, где средние составляют 43,8 и $60,5 \text{ mgCO}_2/\text{m}^2/\text{ч}$ соответственно.

Медианы измеренных значений УП метана из увлажненных заболоченных участков (точки 3.2, 6.2, 5.3) составляют, соответственно $0,77 \text{ mgCH}_4/\text{m}^2/\text{ч}$; $5,62 \text{ mgCH}_4/\text{m}^2/\text{ч}$; $0,13 \text{ mgCH}_4/\text{m}^2/\text{ч}$. Как видно, между точками большой разброс значений, что показывает

необходимость изучения большого количества объектов для получения типичных значений эмиссий из увлажненных участков болот. Похожая картина наблюдалась на увлажненных участках болот южной тундры на площадке «Ясавэй» [3]. Там на разных точках значения медиан УП метана из увлажненных участков составляет $0,03/0,96/1,42/2,42 \text{ мгCH}_4/\text{м}^2/\text{ч}$. Таким образом, эмиссии метана на точке 6.2 больше эмиссий на аналогичных объектах в пределах изучаемого региона и площадки «Ясавэй». При этом эмиссии на двух других участках в окрестностях Норильска согласуются с результатами, полученными в Западной Сибири.

Для УП метана из сухих участков болотных экосистем, как и для минеральных почв, характерны слабые отрицательные потоки, то есть низкоинтенсивный процесс поглощения атмосферного метана. Медианы измеренных значений УП метана на точках 4.2, 6.1 и 5.1 составляют, соответственно $-0,01$, $-0,02$ и $-0,03 \text{ мгCH}_4/\text{м}^2/\text{ч}$. Этот результат практически аналогичен результатам из работы [3], где медиана измеренных УП метана с поверхности мерзлых бугров также оклонулевая и составляет $0,01 \text{ мгCH}_4/\text{м}^2/\text{ч}$, и меньше слабоположительного медианного УП метана в $0,08 \text{ мгCH}_4/\text{м}^2/\text{ч}$ с поверхности мёрзлых бугров на точке «Ямбург» в южной тундре Западной Сибири [22].

Выводы

В рамках исследования изучена эмиссия метана и углекислого газа с поверхности естественных экосистем в пределах Норильского промышленного района в границах 6 выделенных ландшафтных районов. Полученные результаты показывают значительную вариабельность эмиссии парниковых газов для различных типов экосистем. На минеральных почвах и сухих участках болотных ландшафтов фиксируется поглощение метана почвами. Положительные значения эмиссии метана характерны для обводнённых участков болотных экосистем и озёр с максимальными значениями в мочажинах. Эмиссии углекислого газа имеют обратную закономерность: значения удельных потоков CO_2 уменьшаются по мере роста увлажнённости экосистем. Обнаружена средней силы корреляция между температурой приземного слоя воздуха и интенсивностью поглощения метана минеральными почвами. Для водных экосистем характерно одномодальное распределение плотностей вероятности удельных потоков метана и углекислого газа, для остальных же типов экосистем построенные распределения имеют полимодальный характер.

Библиография

1. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the IPCC Sixth Assessment Report / Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M.I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R., Maycock T.K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R., Zhou B. (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2023. 2391 p. doi: 10.1017/9781009157896.
2. Heyer J., Berger U., Kuzin I.L., Yakovlev, O.N. Methane emissions from different ecosystem structures of the subarctic tundra in Western Siberia during midsummer and during the thawing period // Tellus B: Chemical and Physical Meteorology. 2002. Vol. 54 (3). P. 231-249.
3. Сабреков А.Ф., Глаголев М.В., Клепцова И.Е., Максютов Ш.Ш. Эмиссия метана из болот тундры: Результаты наблюдений 2010 г. // Динамика окружающей среды и

- глобальные изменения климата. 2011. Т. 2. №. 1 (3). С. 1-16.
4. Голубятников Л.Л., Казанцев В.С. Вклад тундровых озёр Западной Сибири в метановый бюджет атмосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 4. С. 430–438.
 5. Serikova S., Pokrovsky O.S., Laudon H., Krickov I.V., Lim A.G., Manasypov R.M., Karlsson J. High carbon emissions from thermokarst lakes of Western Siberia // Nature Communications. 2019. Vol. 10. №. 1. P. 1552.
 6. Flessa H., Rodionov A., Dyckmans J., Guggenberger, G. Landscape controls of CH4 fluxes and soil organic matter in a catchment of the forest tundra at the lower Yenissej. In *Symptom of Environmental Change in Siberian Permafrost Region. Proceedings of the International Symposium of JSPS Core to Core Program between Hokkaido University and Martin Luther University Halle-Wittenberg (29-30 November 2005, Sapporo, Japan)* / Hatano R., Guggenberger G. (Eds.). Sapporo: Hokkaido University Press, 2006. P. 65-74.
 7. Kazantsev V.S., Krivenok L.A., Dvornikov Y.A., Lomov V.A., Sabrekov A.F. Methane Emission from Lakes in the North of Western Siberia // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2023. Vol. 59. P. 264–274. doi: 10.1134/S0001433823030052.
 8. Le Mer J., Roger P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review // European journal of soil biology. 2001. V. 37 (1). P. 25-50.
 9. Moore T.R., Dalva M. The influence of temperature and water-table position on carbon-dioxide and methane emissions from laboratory columns of peatland soils // European Journal of Soil Science. 1993. V 44 (4). P. 651–664.
 10. Van Bodegon P.M., Stams A.J.M. Effects of alternative electron acceptors and temperature on methanogenesis in rice paddy soils // Chemosphere. 1999. V. 39 (2). P. 167–182.
 11. Геокриология СССР. Средняя Сибирь / Под ред. Ершова Э.Д. М.: Недра, 1989. 414 с.
 12. Ковпий А.Н. Отчет: «Комплексная гидрогеологическая и инженерно-геологическая съемка масштаба 1:200 000 (Листы R-45-79-82; 91-94; 103-106; 115-118) за 1993-1999 гг.» Талнах: ПГП «Норильскгеология», 2000.
 13. Карта четвертичных образований. Государственная геологическая карта Российской Федерации (третье поколение). Масштаб 1:1 000 000. Серия Норильская. Лист R-45. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2016.
 14. Объяснительная записка. Государственная геологическая карта Российской Федерации (третье поколение). Масштаб 1 : 1 000 000. Серия Норильская. Лист R-45. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2016. С. 320.
 15. Толманов В.А., Гребенец В.И., Исаков В.А., Керимов А.Г. Деформации дорожного полотна в сложных мерзлотногеологических условиях Норильского Промрайона. Материалы докладов XIII Общероссийской научно-практической конференции и выставки «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». Москва: Геомаркетинг, 2017. С. 251–258.
 16. Кравцова В.И., Железный О.М. Динамика растительности Норильского промышленного района под влиянием аэробиогенных и природных факторов. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. Москва: Географический факультет МГУ, 2022. Т. 28 (1). С. 325–345.
 17. Усова Л.И. Практическое пособие по ландшафтному дешифрированию аэрофотоснимков различных типов болот Западной Сибири. СПб.: Нестор-История, 2009. 78 с.

18. Hutchinson G.L., Mosier A.R. Improved soil cover method for field measurement of nitrous oxide fluxes // Soil Science Society of America Journal. 1981. Vol. 45 (2). P. 311-316.
19. Глаголев М.В., Сабреков А.Ф., Казанцев В.С. Физикохимия и биология торфа. Методы измерения газообмена на границе почва-атмосфера. Томск: Изд-во ТГПУ, 2010. 104 с.
20. Greenhouse Gas Emissions: Fluxes and Processes, Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments. Environmental Science Series / Tremblay A., Varfalvy L., Roehm C., Garneau M. (Eds.). N.Y.: Springer, 2005. 732 p.
21. Fiedler J., Fuß R., Glatzel S., Hagemann U., Huth V., Jordan S., Jurasinski G., Kutzbach L., Maier M., Schaefer K., Weber T., Weymann D. Best practice guideline: Measurement of carbon dioxide, methane and nitrous oxide fluxes between soil-vegetation-systems and the atmosphere using non-steady state chambers. Göttingen: Arbeitsgruppe Bodengase, Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, 2022. 70 p. doi: 10.23689/fidgeo-5422.
22. Сабреков А.Ф., Глаголев М.В., Клепцова И.Е., Башкин В.Н., Барсуков П.А, Максютов Ш.Ш. Вклад мерзлотных бугров в эмиссию метана из болот тундры Западной Сибири // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2011. Т. 2. №. 2 (4). С. 2.

Результаты процедуры рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Предмет исследования являются, по мнению автора, особенности изучения образования и эмиссия парниковых газов из природных экосистем Норильского промышленного района причем источниками метана и углекислого газа в атмосфере являются как антропогенные, так и природные, среди последних значимую роль играют озера, реки, болота.

Методология исследования исходя из анализа статьи можно сделать вывод о использовании методов предварительного районирования территории по природным условиям, определяющим формирование многолетнемерзлых пород, дистанционного мониторинга земной поверхности для выявления типичных ландшафтов. Автор статьи исследовал время полевых исследований удельные потоки метана и углекислого газа, степень увлажненности почвогрунтов в зависимости от геоморфологии и многолетнемерзлых пород, проводил статистическая обработка данных полученный от проксимацией измеренных значений в при помощи функции density с определением оптимальной ширины окна методом Sheather & Jones (1991). Автором предпринятой экспедиционные полевые методы исследования, эксперименты в исследования потоков парниковых газов с последующих камеральной обработкой.

Актуальность затронутой темы мониторинге безусловна и состоит в получении информации об актуальных процессах изменения климата, обусловленные в том числе ростом содержания в атмосфере парниковых газов начиная с середины XIX века к числу которых относятся водяной пар, метан и углекислый газ. Одной из актуальных задач современной экологии является инвентаризация источников ПГ в глобальном масштабе для адекватной оценки эмиссии парниковых газов природными и антропогенными источниками, так и для построения и верификации прогнозных моделей эмиссии в

условиях изменения климата. Исследования автора статьи помогают понять механизм газообмена на изменение погодно-климатических условий.

Научная новизна заключается в попытке автора статьи на основе проведенных исследований делает вывод о результатах натурных, лабораторных и теоретических изысканиях в рамках исследования эмиссии метана и углекислого газа с поверхности естественных экосистем в пределах Норильского промышленного района в границах шести выделенных ландшафтных районов. Полученные результаты показывают значительную вариабельность эмиссии парниковых газов для различных типов экосистем, что является важным дополнением в развитии геоэкологии.

Стиль, структура, содержание стиля изложения результатов достаточно научный. Статья снабжена богатым иллюстративным материалом, отражающим процесс образования эмиссии метана и углекислого газа с поверхности естественных экосистем. Таблицы, графики, фотографии весьма иллюстративный, хотя таблица можно было бы и несколько сократить проводя систематизацию представленного материала или визуализировать в форме диаграмм. В лабораторных условиях рассмотрены процессы изучения в разных ландшафтах, что делает представленные автором статьи результаты весьма интересными.

Библиография весьма исчерпывающая для постановки рассматриваемого вопроса, но не содержит ссылки на нормативно-правовые акты.

Апелляция к оппонентам представлена в выявлении проблемы на уровне имеющейся информации, полученной автором в результате анализа.

Выводы, интерес читательской аудитории в выводах есть обобщения, позволившие применить полученные результаты. Целевая группа потребителей информации в статье не указана.