

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Ли Ч., Брушков А.В., Чеверев В.Г., Ло Ю., Соколов А.В. Механизм выбросов метана при поверхностном замерзании осенью // Арктика и Антарктика. 2025. № 2. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.2.74170 EDN: ZDFPCD
URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=74170

Механизм выбросов метана при поверхностном замерзании осенью

Ли Чэнчжэн

аспирант; кафедра Геокриология; Московский государственный университет им. МВ. Ломоносова

119234, Россия, г. Москва, р-н Раменки, тер. Ленинские Горы, д. 1

✉ lichenzheng0912@gmail.com



Брушков Анатолий Викторович

доктор геолого-минералогических наук

зав. кафедрой; кафедра геокриология; Московского государственного университета им. МВ. Ломоносова

119234, Россия, г. Москва, Ленинские Горы, д. 1

✉ brouchkov@hotmail.com



Чеверев Виктор Григорьевич

доктор геолого-минералогических наук

зав. кафедрой; кафедра геокриология; Московского государственного университета им. МВ. Ломоносова

119234, Россия, г. Москва, Ленинские Горы, д. 1

✉ cheverev44@mail.ru



Ло Юньхан

аспирант; кафедра геокриология; Московского государственного университета им. МВ. Ломоносова

119234, Россия, г. Москва, Ленинские Горы, д. 1

✉ lyhmsu@mail.ru

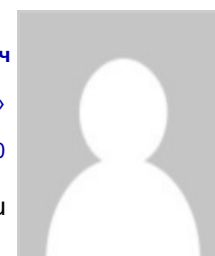


Соколов Андрей Владимирович

Главный инженер - ведущий специалист по газоаналитической технике (приборам); ООО «НИИИТ»

123592, Россия, г. Москва, Кулакова, 20

✉ sok44@yandex.ru



[Статья из рубрики "Природные ресурсы Арктики и Антарктики"](#)

DOI:

10.7256/2453-8922.2025.2.74170

EDN:

ZDFPCD

Дата направления статьи в редакцию:

20-04-2025

Дата публикации:

11-06-2025

Аннотация: В настоящее время одной из глобальных экологических проблем является глобальное потепление, вызванное повышенной концентрацией парниковых газов в атмосфере. Метан является одним из ключевых газов, влияющих на климатические изменения. Концентрация метана значительно увеличилась в атмосфере за последние 20 лет и продолжает увеличиваться до сих пор. Ученые и политики всего мира обеспокоены данной проблемой и ищут способы решения глобального потепления. Под общей тенденцией глобального потепления изучение характеристик выбросов метана в промерзающих породах имеет большое значение для точной оценки и прогнозирования содержания парниковых газов в атмосфере. Предметом данного исследования является механизм выброса метана при поверхностном замерзании в осенний период времени. Объектом данного исследования является выброс метана в условиях замерзания. В данной работе в качестве метода исследования выбросов метана рассматривается уникальный программный комплекс Solidworks, который предполагает его использование в таких направлениях, как инженерная геология, мерзлотоведение, грунтоведение и др. Научная новизна данного исследования заключается в том, что в нем разрабатываются механизмы выброса метана при изменении температуры осенью с разных поверхностей: с поверхности водоемов и с поверхности почвы, также в статье предлагаются методы по контролю данного механизма и управлению метановыми выбросами при сезонном похолодании. Кроме того, представлена сравнительная таблица факторов, влияющих на выбросы метана в водоемах и почве при поверхностном замерзании осенью. Делается вывод о возможности приведения данных факторов к единому знаменателю и применении ко всем элементам экосистемы. Для разработки механизмов выбросов метана в данной работе были изучены актуальные научные и опытные исследования последних пяти-десяти лет, такие как замеры метана в торфяниках Китая и Японии, на озере Кортковское (Польша), на Северной Аляске, в тундре и условиях вечной мерзлоты. Результатами данного исследования являются схемы выбросов метана при замерзании почвы и водоема в осенний период времени. Было выявлено, что факторы влияющие на метаногенез и для почвы, и для водоемов имеют схожее происхождение, что связано с тем, что они находятся в одной экосистеме.

Ключевые слова:

выбросы метана, парниковый эффект, изменения климата, геология, повышение

температуры, поверхностное замерзание, механизм выброса метана, глобальное потепление, метан, замерзание почвы

Введение

По данным Межправительственной панели по изменению климата (IPCC), метан имеет глобальный парниковый потенциал, который в среднем в 28–34 раза превышает показатели углекислого газа (CO_2), на протяжении ста лет [\[1\]](#). В представленном в конце 2023 г. Сводном отчете МГЭИК отмечается, что причина глобального потепления на $1,1^\circ\text{C}$ в 2011–2020 гг. в сравнении с периодом 1850–1900 гг. стала хозяйственная деятельность человека [\[2\]](#). В Отчете отмечается, что отсутствие действий по сокращению парникового эффекта от хозяйственной деятельности человека приведет к глобальному потеплению на $1,5^\circ\text{C}$ в течение ближайших 20 лет. Это увеличит риск всех опасностей и негативных последствий для жизни на Земле при изучении всех возможных смоделированных ситуациях.

Одним из катализаторов парникового эффекта является метан (CH_4), который выделяется в том числе из естественных экосистем, таких как водоемы и почвы. Стоит разделять эмиссии и выбросы CH_4 . Эмиссия характеризуется небольшим выделением CH_4 в атмосферу, тогда как выброс подразумевает выделение большего количества метана. Проблемой данного исследования является то, что полностью механизмы выброса метана при замерзании не до конца изучен [\[3\]](#).

Также в этом исследовании представлены современные методы и программы для оценки воздействия на окружающую среду, для проведения термического анализа, а также для трехмерного моделирования проектов и картографических исследований. На данном этапе развития геологии, геоэкологии и грунтоведения такие современные решения могут стать частью комплекса мер по снижению углеродного следа.

Данное исследование посвящено изучению механизмов выброса CH_4 при замерзании поверхности водоемов и поверхности почв. Задачами исследования являются: определение факторов, влияющих на интенсивность выбросов CH_4 , изучение физико-химических процессов, происходящих в период замерзания, оценка влияния температуры и других условий на выделение CH_4 .

Стоит отметить, что исследование механизма выбросов метана в период замерзания осенью важно не только с точки зрения экологии и экосистемы, но и для того, чтобы разработать адекватные меры мониторинга профилактики и управления климатическими рисками. Есть две стратегии поведения комитетов по климату правительств разных стран: «стратегия митигации» (стратегия уменьшения последствий) и «стратегия адаптации» (подстраивание под новые условия) [\[4\]](#). Для реализации той или иной стратегии необходимо иметь достаточный и релевантный инструментарий, который и рассматривается в данной статье. Таким образом, данное исследование может быть актуальным для решения глобальных экологических и климатических проблем [\[5\]](#).

При проведении исследования применены методы систематического обзора литературы, сравнительный метод, метод визуализации, синтез.

Выбросы метана и факторы изменения климата

Водоемы, особенно в северных широтах, являются существенными источниками эмиссии и выброса CH_4 . Метан образуется в водоемах в результате анаэробного разложения органических веществ и донных отложений. Этот процесс обычно активируется различными факторами, такими как изменение температуры, повышение доступности органического материала, динамика химических условий в воде. Часто учеными рассматриваются арктические регионы, в которых сосредоточены большие массы льда, подверженные изменениям в связи с глобальным потеплением [\[6, 7, 8\]](#).

Таким образом, самые значительные выбросы CH_4 случаются тогда, когда происходит изменение температуры, поэтому особенно актуальным является рассмотрение механизмов выброса метана в осенний период, когда происходит замерзание и таяние льдов. Это оказывает значительное влияние на динамику метановых выбросов, водоемы покрываются ледяной коркой, которая таким образом задерживает CH_4 , а затем, когда происходит резкое потепление, это приводит к выбросу. Для науки особенно важными являются расчеты силы выброса CH_4 в зависимости от тех или иных факторов.

Разберем, какие факторы влияют на процесс выброса метана в водоемах (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение факторов, влияющих на метаногенез в водоемах и почвах

Фактор	Влияние на метаногенез в водоемах	Влияние на метаногенез в почвах	Данные
<i>Температура</i>	Низкие температуры замедляют метаногенез, высокие ускоряют и способствуют выбросу. [9]	Низкие температуры замедляют метаногенез, высокие ускоряют и способствуют выбросу. [10]	Так, при температуре ниже 0°C скорость выработки метана снижается до 50%, а при повышении температуры до $25-30^\circ\text{C}$ - увеличивается на 30-40%. [11]
<i>Содержание органических веществ</i>	Высокое содержание органических веществ (например, планктон, растительность) содействуют образованию CH_4 . [9,11]	Высокое содержание органических веществ (например, торф, растительность) содействуют образованию CH_4 . [10]	Так, в заболоченных районах с высоким уровнем растительного разложения концентрация метана может превышать 200 мг/м^2 в сутки. В океане во время цветения планктона уровень CH_4 может вырасти на 30-40%. Что касается почв, то если масса органического материала составляет более

			5%, то выбросы метана увеличиваются до 40%. [10,11]
<i>Уровень воды</i>	Высокий уровень повышает метаногенез. [9]	Высокий уровень грунтовых вод повышает метаногенез. [10,11]	Затопленные поля или болотистые территории отличаются высоким уровнем выброса метана - примерно 200-500 мг CH ₄ /м ² в сутки, при этом в засушливых почвах выбросы составляют всего 20-50 CH ₄ /м ² . [11]
<i>Тип среды</i>	Различные водоемы могут иметь разные состав донных отложений, который влияет на метаногенез. [9]	Различные типы почвы по-разному влияют на производство и накопление CH ₄ . [10]	В заболоченных озерах с органическим составом донных отложений выбросы метана могут достигать 300-600 мг CH ₄ /м ² в сутки, при этом в водоемах с минеральными донными отложениями (например, горные озера), выбросы могут составлять менее 50 мг CH ₄ . [11]
<i>Состояние микробиоты</i>	Микроорганизмы в водоемах влияют на метаногенез. [9]	Микроорганизмы в почве влияют на метаногенез. [10]	Наличие органики и концентрация метаногенных бактерий может увеличивать скорость метаногенеза до 200-400 мг CH ₄ /м ² в сутки. [10, 11]
<i>Толщина</i>	Толщина ледяного покрова влияет	Толщина льда и промерзшего слоя	Если толщина ледяного покрова составляет 1-1,5 м, то скорость выброса метана может составлять всего 5-

льда	на уровень накопления и выброса CH_4 . [9,10]	почвы влияет на уровень накопления и выброса CH_4 . [10]	15 мг $\text{CH}_4/\text{м}^2$ в сутки. при толщине менее 30 см выбросы метана могут достигать 100-300 мг $\text{CH}_4/\text{м}^2$ в сутки. [11]
Осадки и уровень снег	Осадки, в том числе накопившийся на замерзшем водоеме снег, влияют на метаногенез. [9]	Осадки, в том числе слой снега на почве, влияют на метаногенез. [10]	При снежном покрове в 10-20 см скорость выброса метана достигает 50-150 мг $\text{CH}_4/\text{м}^2$ в сутки, в водоемах и почвах без снега - только 20-50 мг $\text{CH}_4/\text{м}^2$ в сутки. [11]

Из табл. 1 видно, что факторы и для почвы, и для водоемов имеют схожее происхождение, что связано с тем, что они находятся в одной экосистеме. Эти факторы, которые могут изменить процесс эмиссии и выбросов метана при замерзании. Также в последние годы появляются и другие, более сложные модели, которые могут изучать выбросы метана в течение длительного времени или с учётом пространственных изменений. Так, норвежские ученые предложили концептуальную модель, которая устанавливает эндогенную и взаимоусиливающую связь между уязвимостью, насилием и воздействием на изменение климата [\[12\]](#).

Несмотря на сделанный вывод, исследования последних лет в различных регионах мира показывают, что общего понимания механизма метановых выбросов не существует [\[13\]](#). Большие различия наблюдаются в зависимости от региона и динамики выбросов. Так, северные высокоширотные водно-болотные земли тундры вносят существенный вклад в общие выбросы CH_4 . Отмечено, что выбросы падают после вегетационного периода и значительно увеличиваются в период замерзания, причем их количество примерно равно выбросам в течение всего летнего сезона [\[14\]](#).

Исследования в Северной Аляске в течение шестнадцати лет привели к выводу, что осенние повышения выброса CH_4 коррелируют с более поздним замерзанием почвы, что связано с тем, что температура почвы держится около 0°C перед замерзанием [\[15\]](#). Еще одно исследование позволило наблюдать повышенные концентрации CH_4 и CO_2 в почве и воздухе в процессе замерзания почвы и росте снежного покрова при отсутствии вечной мерзлоты [\[16\]](#).

Четырехлетние измерения на озере Ильмензее показали, что хранение CH_4 сильно отличается по годам. Если в 2012 году годовой максимум был 5250 кг метана, то в 2013 году – 2013 кг метана. Ученые установили, что это не связано с наличием или отсутствием кислорода в воде или температурой осадков, а связано с поступлением в водоем органических веществ, в частности, с цветением фитопланктона, который способен хранить метан в течение года [\[17\]](#).

Исследования на польском озере Коровское в течение четырех лет также

продemonстрировали различия в среднегодовых значения, однако они не были большими: средние выборы в 2019, 2020, 2021 и 2022 гг.. составили 13,7, 10,1, 11,8 и 11,6 мг соответственно. Основными факторами влияния на выбросы были названы температура воды и температура воздуха. Исследование позволяет прогнозировать увеличение выбросов CH_4 более чем на 30% к 2100 году [\[18\]](#).

На торфянике равнины Саньцзян в Китае было зафиксировано значительное увеличение выбросов CH_4 в период замерзания и оттаивания [\[19\]](#). Период весеннего таяния снега также вызывает больший выбор CH_4 на торфянике на Хоккайдо в Японии [\[20\]](#).

Трансформация механизмов выбросов метана при поверхностном замерзании почвы и воды

Для сбора данных можно использовать сенсоры для изменения концентрации метана в воде, например, газоанализатор и инверсионные камеры. Также для исследования состава воды и донных отложений можно использовать пробоотборники. Для измерения температуры воды и льда – специальные термометры. Также применяется изотопный метод при наблюдении за пространственно-временным распределением атмосферного CH_4 [\[21\]](#).

Рассмотрим детально механизм выброса CH_4 при поверхностном замерзании водоема осенью:

1. Начало осеннего сезона, что ведет к понижению температуры воздуха.
2. Понижение температуры воздуха ведет к постепенному понижению температуры воды.
3. Понижение температуры воды приводит к замерзанию водоема и началу процесса образования льда на поверхности водоема.
4. Ледяной барьер на поверхности водоёма приводит к ограничению газообмена между водой и атмосферой.
5. Из-за ледяного барьера происходит естественное накопление CH_4 в воде и в донных отложениях.
6. Смена температуры приводит к таянию льда и образованию трещин ледяного покрова на водоеме.
7. Происходит выброс CH_4 в атмосферу через трещины во льду.
8. Воздействие метана на атмосферу, увеличение его концентрации в атмосфере, что способствует парниковому эффекту.

Представим этот механизм в виде наглядной схемы (рис. 1):

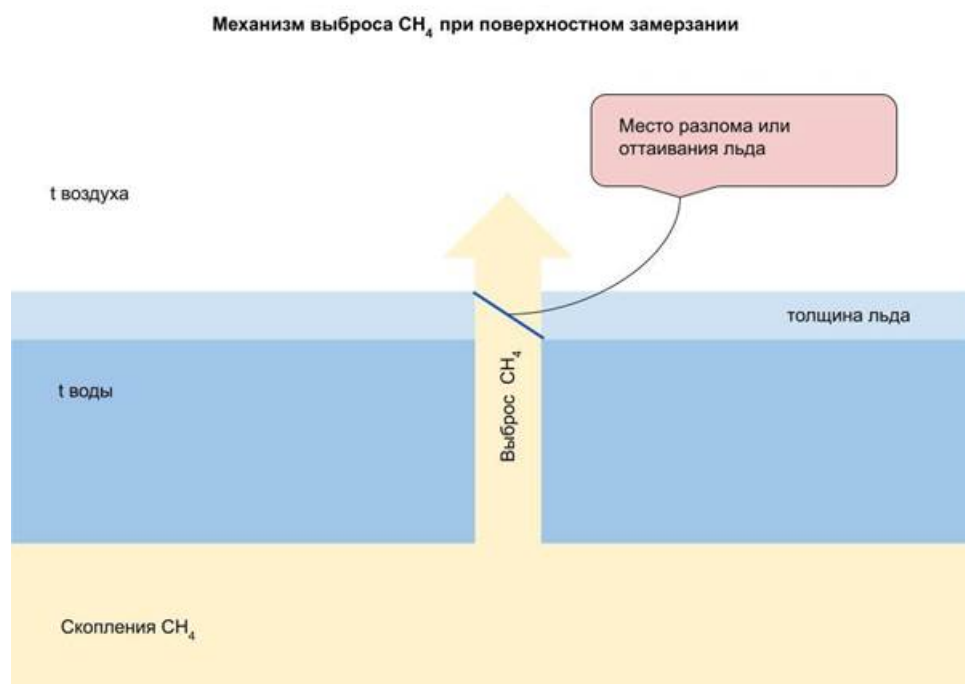


Рис. 1. Механизм выброса метана при поверхностном замерзании водоема (разработано автором).

Поскольку ранее мы выяснили, что механизм выброса CH_4 при поверхностном замерзании почвы является таким же, можно отнести описание и схему и к этой части экосистемы. Вода на рисунке может быть заменена на почву, под которой находятся скопления метана. В месте разлома или оттаивания льда происходит выброс CH_4 .

Методы исследования механизмов выброса метана и их предупреждения

Для глубокого исследования механизмов выброса CH_4 на местности геологам и картографам необходимо использовать современное оборудование, а также инновационное программное обеспечение. Одним из примеров такого ПО является уникальный программный комплекс Solidworks [\[22\]](#), который предполагает его использование в таких направлениях, как инженерная геология, мерзлотоведение, грунтоведение и др.

Общая ситуация механизмов выброса метана в природе можно описать в следующей классификации:

1. Разложение органики. В условиях недостатка кислорода, например, в болотах, торфяниках и на дне водоемов, микробы разлагают органические вещества, выделяя метан как побочный продукт. Крупный рогатый скот и другие травоядные выделяют метан в процессе пищеварения (метаногенез) через отрыжку. В почвах, особенно в условиях высокой влажности, некоторые микроорганизмы могут производить метан в процессе разложения органических веществ. Разложение растительности в условиях, когда кислород ограничен, также может приводить к образованию метана.

2. Подводные отложения. Метан может находиться в форме гидратов на дне океанов и в арктических регионах. При изменении давления или температуры эти гидраты могут разлагаться, высвобождая метан в атмосферу.

3. Тектоническая активность. В некоторых регионах метан может выделяться из недр

Земли в результате геологических процессов, таких как разломы и вулканическая активность.

Человеческая техносфера тоже может способствовать выбросу метана в атмосферу. Хотя это не совсем природный механизм, стоит отметить, что некоторые выбросы метана происходят из природных источников, таких как нефтяные и газовые месторождения, где метан может утекать в атмосферу.

Измерение выбросов метана сложно, особенно в удаленных или труднодоступных районах: большие пространства и сложные геологические наложения крайне неудобны для исследований. Это затрудняет оценку масштабов проблемы и разработку эффективных стратегий. Уровни выбросов могут варьироваться в зависимости от времени года, погодных условий и других факторов, что делает мониторинг еще более сложным, внедрение технологий для упреждения выбросов метана может требовать значительных инвестиций. Например, в сельском хозяйстве могут потребоваться новые методы управления скотом и кормами, или по изучению микрофлоры почв, химического состава литосферы, поиска косвенных маркеров возможных выбросов газа. Разработка и внедрение новых технологий, таких как системы улавливания метана на свалках или в животноводстве, могут быть сложными и требовать времени, затраты на фундаментальную науку в рамках грантовой системы небольшие, бизнес и государство хочет быстрый результат (в итоге не имея никакой).

SOLIDWORKS Sustainability выявит факторы воздействия на окружающую среду в режиме реального времени. Результаты отображаются в Панели оценки экологического воздействия, которая динамически обновляется при внесении изменений.

Пользовательские отчеты позволяют представить полученные результаты для всеобщего пользования.

Так, инженеры используют специальное расширение программы Solidworks Sustainability, которая имеет панель оценки экологического воздействия в режиме реального времени. Она позволяет отображать оценку воздействия предпринимаемых действий или разрабатываемого проекта на окружающую среду по двум разным методологиям оценки: CML или TRACI. Первый метод используется по умолчанию и предназначен для региональных климатических условий европейских государств, второй метод основан на данных о природных и климатических условиях Северной Америки.

Программа Solidworks Sustainability позволяет производить расчет основных экологических индикаторов: углеродного следа, потребления энергии, загрязнения воды и окисления воздуха. В оценку углеродного следа входит оценка углекислого газа и метана. Углеродный след отображается в виде диаграмм, которые демонстрируют степень воздействия и выражается в процентах. Кроме того, это программное обеспечение позволяет сравнить эффект новых параметров с эффектом тех параметров, которые были применены ранее (рис. 2).

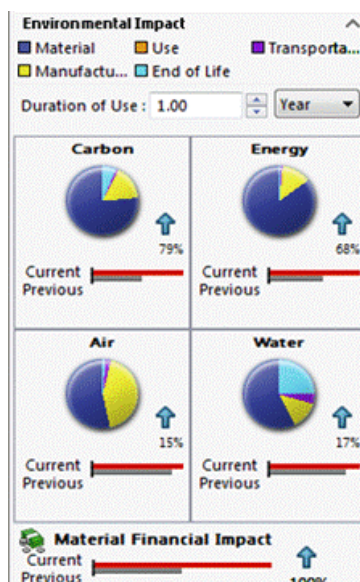


Рис. 2. Показатели воздействия на окружающую среду в программе Solidworks (источник — сайт Solidworks).

Рассмотрим другие методы изучения механизмов выбросов метана, которые позволяют определять залежи скопления газов и предотвращать их воздействие на озоновый слой. Так, для распознавания газовых факелов в Мировом океане на глубине от нескольких десятков метров до нескольких километров ученые используют акустический метод. В частности, применяются усовершенствованные судовые эхолоты, такие как «Сарган-ЭМ», «ELAC LAZ-72», гидролокаторы «Сарган-ГМ», а также многоканальная система цифровой регистрации акустических сигналов.

Так, в 2021 г. группа исследователей опубликовала результаты исследований потока метана из газовых факелов, проведенных на борту НИС «Академик М. А. Лаврентьев» в Охотском море на глубине 2220 м. Они наблюдали за количеством выделяемого метана в течение 2012–2018 гг. и выявили прямую связь между выбросами метана и глубинными землетрясениями, произошедшими в Охотском море [23, 24, 25].

Подобный гидроакустический комплекс из современных эхолотов, гидролокаторов и специального программного обеспечения позволяет осуществлять сбор акустической информации при вертикальном зондировании. Это бережный метод, который не нарушает естественное состояние газовых факелов, позволяя собирать о них всю необходимую информацию. Эхолоты работают вертикально на разных частотах, сканируя водную толщу и морское дно [26]. Гидролокаторы могут осуществлять сканирование под любым углом, что в совокупности дает максимальный обзор изучаемой области. Результат отображается в виде детальных эхограмм (рис. 3).

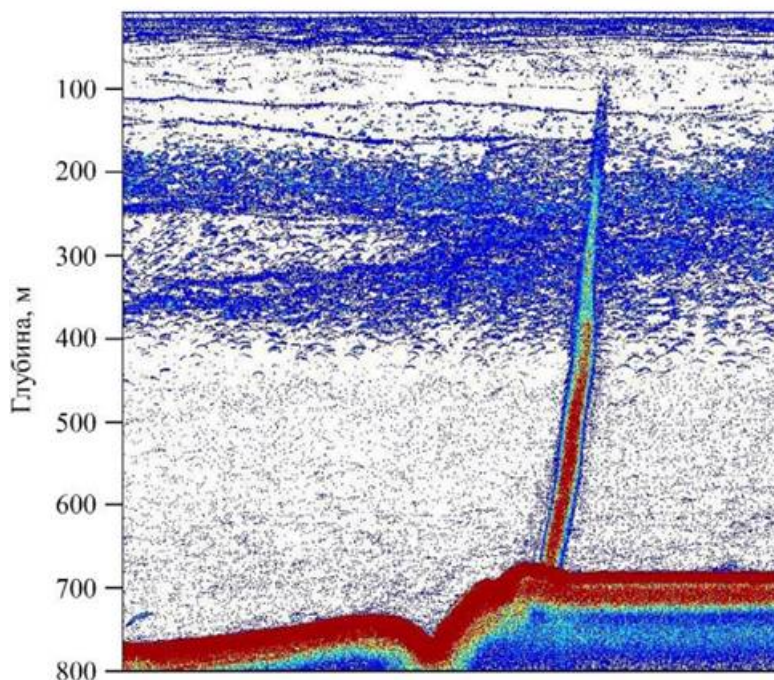


Рис. 3. Результат отображения данных эхолота [\[18\]](#).

Следующий метод выявления выбросов метана – дистанционное зондирование, которое может применяться для определения сейсмических аномалий. В 2024 г. группа ученых впервые применила этот метод с помощью Robust Satellite Technique (RST) [\[27\]](#). Эта технология позволила им изучить данные о выбросах CH_4 , полученные с помощью атмосферного инфракрасного зонда, а затем применить их к землетрясению в Турции и Сирии 2023 года.

Данные о выбросах метана были получены с помощью гиперспектрального датчика, который установлен на одном из искусственных спутников Земли. Датчик имеет 2378 спектральных каналов и способен сканировать всю планету дважды в день. На основе полученных данных была разработана трехмерная структура аномальных выбросов метана, однако ученые отмечают, что миграция воздушных масс и атмосферная циркуляция вносят серьезные коррективы в результаты исследования [\[28, 29\]](#). При необходимости изучить выбросы метана в конкретном регионе могут наблюдаться временные [\[30\]](#) и региональные неточности. Однако метод дистанционного зондирования с помощью спутника был впервые опробован для установления механизмов выбросов метана, что уже является важным шагом для научного сообщества.

Заключение

В ходе исследования выявлены основные факторы, влияющие на интенсивность выбросов метана при поверхностном замерзании почвы или водной поверхности во время осенне-зимнего периода: температура, содержание органических веществ, уровень воды, тип среды, состояние микробиоты, толщина льда и уровень осадков. Показано, что низкие температуры замедляют метаногенез, а высокие – ускоряют и способствуют выбросу газа. Установлено, что факторы, влияющие на метаногенез как в почве, так и в водоемах, имеют схожее происхождение, что обусловлено их нахождением в единой экосистеме. Исследование позволило разработать методы контроля и управления метановыми выбросами при сезонном похолодании. Показана эффективность использования современного программного комплекса Solidworks для моделирования процессов метаногенеза, а также применения акустического метода и

дистанционного зондирования для определения выбросов метана.

Основным итогом данного исследования является визуализация механизма метановых выбросов при замерзании, с демонстрацией сути выбросов большого количества CH_4 , на основе данных о температуре, толщине льда, осадках, микробном содержании воды или почвы. Систематизация и анализ данных о влиянии набора этих факторов способствует глубокому пониманию механизма выброса метана в каждой конкретной экосистеме.

Полученные результаты имеют важное значение для разработки стратегий мониторинга и управления климатическими рисками, включая как стратегию уменьшения последствий (митигации), так и стратегию адаптации к новым условиям. Исследование доказывает необходимость дальнейшего изучения механизмов выбросов метана для эффективного решения глобальных экологических и климатических проблем.

Научная новизна данного исследования заключается в том, что в нем разрабатываются механизмы выброса метана при изменении температуры осенью с разных поверхностей: с поверхности водоемов и с поверхности почвы, а также в статье предложены методы по контролю данного механизма и управлению метановыми выбросами при сезонном похолодании.

Библиография

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Электронный ресурс. URL: <https://www.ipcc.ch/> (дата обращения: 23.07.2024).
2. Synthesis Report AR6. Climate Change 2023 // Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Электронный ресурс. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/resources/spm-headline-statements> (дата обращения: 23.07.2024).
3. Yang M. H., Ya T. D., Hirose N., Hideyuki F. Daily freeze-thaw cycle of the surface soil layer on the Qinghai-Tibet Plateau // Chinese Science Bulletin. 2006. № 51. С. 1974-1976.
4. Никитина Е. Н. Изменение климата в Арктике: адаптация в ответ на новые вызовы // Контуры глобальных трансформаций: политика, экономика, право. 2019. № 5. С. 177-200. DOI: 10.23932/2542-0240-2019-12-5-177-200 EDN: OISKHG.
5. Влад И. В., Шароватов А. А. Вопросы предотвращения последствий глобального изменения климата в Арктике // Инновации и инвестиции. 2023. № 1. EDN: LFVAWK.
6. Папцова И. И., Каманин В. М. Воздействие изменения климата на арктические экосистемы и оценки эмиссии парниковых газов при использовании морских судов // Труды Крыловского государственного научного центра. 2021. № S1. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-1-S-I-252-254 EDN: WDGCVV.
7. Sauer S., Hong W.-L., Yao H., Lepland A., Klug M., Eichinger F., Himmler T., Crémière A., Panieri G., Schubert C. J., Knies J. Methane transport and sources in an Arctic deep-water cold seep offshore NW Svalbard (Vestnesa Ridge, 79°N) // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2021. V. 167. P. 103430. DOI: 10.1016/j.dsr.2020.103430. EDN: PRCHSU.
8. Бодански Д. Интервенции в области изменения климата Арктики // Международный журнал морского и прибрежного права. 2020. № 35(3). С. 596-617.
9. Methane, explained. National Geographic. Электронный ресурс. URL: <https://www.nationalgeographic.com/environment/global-warming/methane/> (дата обращения: 23.01.2025).
10. Office of Air and Radiation, US EPA (October 7, 1999). U.S. Methane Emissions 1990-2020: Inventories, Projections, and Opportunities for Reductions (EPA 430-R-99-013). URL: <https://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2013/07/EPA-Methane-Emissions->

1990-2020.pdf (дата обращения: 04.02.2025).

11. Руководство пользователя по оценке выбросов углекислого газа, метана и закиси азота в сельском хозяйстве с использованием инструмента государственного кадастра (PDF). URL: [https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-](https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-12/documents/ag_module_users_guide.pdf)

12/documents/ag_module_users_guide.pdf (дата обращения: 11.02.2025).

12. Buhaug H., von Uexkull N. Vicious Circles: Violence, Vulnerability, and Climate Change // *Annual Review of Environment and Resources*. 2021. № 46. DOI: 10.1146/annurev-environ-012220-014708. EDN: QDQOJM.

13. Sorensen P. O., Finzi A. C., Giasson M.-A., Reinmann A. B., Sanders-DeMott R., Templer P. H. Winter soil freeze-thaw cycles lead to reductions in soil microbial biomass and activity not compensated for by soil warming // *Soil Biology and Biochemistry*. 2018. № 116. С. 39-47. DOI: 10.1016/j.soilbio.2017.09.026.

14. Mastepanov M., Sigsgaard C., Dlugokencky E., Houweling S., Ström L., Tamstorf M., Christensen T. R. Large tundra methane burst during onset of freezing // *Nature*. 2009. № 456. С. 628-630. DOI: 10.1038/nature07464. EDN: MLZBOB.

15. Arndt K., Oechel W., Goodrich J., Bailey B., Kalhori A., Hashemi J., Sweeney C., Zona D. Increased methane emissions due to later soil freezing in Arctic tundra ecosystems. 2019.

16. Ли Ч., Брушков А., Чеверев В., Соколов А., Ли К. Эмиссия метана и углекислого газа при замерзании почвы без вечной мерзлоты // *Энергии*. 2022. № 15. С. 2693. DOI: 10.3390/en15072693.

17. Ragg R., Peeters F., Ingwersen J., Teiber-Sießegger P., Hofmann H. Interannual Variability of Methane Storage and Emission During Autumn Overturn in a Small Lake // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2021. № 126. DOI: 10.1029/2021JG006388. EDN: CEEHFB.

18. Скверавски А. Сезонная и годовая изменчивость выбросов метана в атмосферу с поверхности эвтрофного озера, расположенного в умеренной зоне (озеро Кортковское, Польша). 2024. DOI: 10.5194/egusphere-2024-1786.

19. Kuttim M., Hofsommer M. L., Robroek B. J. M., Signarbieux C., Jassey V. E. J., Laine A. M. Freeze-thaw cycles simultaneously reduce carbon uptake by peatland photosynthesis and ecosystem respiration // *Boreal Environ.* 2017. № 22. С. 267-276. EDN: YFSEUZ.

20. Tokida T., Mizoguchi M., Miyazaki T., Kagemoto A., Nagata O., Hatano R. Episodic methane ejection from peatlands during spring thaw // *Chemosphere*. 2007. № 70. С. 165-171. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2007.06.042. EDN: LZXYJR.

21. Mikhailov-Fletcher S., Tans P., Brachwiler L., Miller J., Neumann M. CH₄ sources estimated from atmospheric CH₄ observations and its C-13/C-12 isotope ratios: 1. Inverse modeling of source processes // *Global Biogeochemical Cycles*. 2004. Vol. 18. № 18.

22. Официальный сайт Solidworks. Электронный ресурс. URL: <https://www.solidworks.com/> (дата обращения: 11.02.2025).

23. Черных Д., Саломатин А., Юсупов В., Шахова Н., Космач Д., Дударев О., Гершелис Е., Силионов В., Ананьев Р., Семилетов И. Акустические исследования глубоководных газовых факлов Охотского моря // *Вестник Томского политехнического университета "Инжиниринг геологических активов"*. 2021. № 332. С. 57-68. DOI: 18799/24131830/2021/10/3286.

24. Лейфер И., Черных Д., Шахова Н., Семилетов И. Оценка потока газа гидролокатором с помощью пузырьковой инсонификации: применение к потоку пузырьков метана из областей просачивания во внешнем море Лаптевых // *Криосфера*. 2017. Т. 11. № 3. С. 1333-1350.

25. Макаров М., Муякшин С., Кучер К., Асламов И., Гранин Н. Исследование газового сипа Исток на Селенгинском мелководье активными акустическими, пассивными акустическими и оптическими методами // *Журнал исследований Великих озер*. 2020. Т.

46. С. 95-101.

26. Veloso M., Greinert J., Mienert J., De Batist M. A new methodology for quantifying bubble flow rates in deep water using split-beam echosounders: Examples from the Arctic offshore NW-Svalbard // Limnology and Oceanography-Methods. 2015. V. 13. № 6. С. 267-287. DOI: 10.1002/lom3.10024. EDN: UONQKV.

27. Huang Y., Cui J., Zhima Z., Jiang D., Wang X., Wang L. Construction of a Fine Extraction Process for Seismic Methane Anomalies Based on Remote Sensing: The Case of the 6 February 2023, Türkiye-Syria Earthquake // Remote Sensing. 2024. № 16. С. 29-36. DOI: 10.3390/rs16162936. EDN: SBPIWR.

28. Eshkuvatov H., Ahmedov B., Shah M., Begmatova D., Jamjareegulgarn P., Melgarejo-Morales A. Exploring Electromagnetic Wave Propagation Through the Ionosphere Over Seismic Active Zones // Pure Application Geophysics. 2024. № 1-15.

29. Myrvoll-Nilsen E., Sørbye S. H., Fredriksen H. B., Rue H., Rypdal M. Statistical estimation of global surface temperature response to forcing under the assumption of temporal scaling // Earth System Dynamics. 2020. V. 11. № 2. С. 329-345. DOI: 10.5194/esd-11-329-2020. EDN: OAXWBE.

30. Von Uexkull N., Buhaug H. Security implications of climate change: A decade of scientific progress // Journal of Peace Research. 2021. № 58(1). С. 3-17. DOI: 10.1177/0022343320984210. EDN: ZVWXNW.

31. Yang Zao, Zhu Dan, Liu Liangfeng, Liu Xinwei, Chen Huai. The Effects of Freeze-Thaw Cycles on Methane Emissions From Peat Soils of a High-Altitude Peatland // Frontiers in Earth Science. 2022. № 10. DOI: 10.3389/feart.2022.850220. EDN: MUAYOF. ""

Результаты процедуры рецензирования статьи

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

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

Предметом исследования является изучение механизмов выброса метана при замерзании водоемов и поверхности почв в осенне-зимний период.

В связи с этим, предлагаем добавить в название статьи словосочетание «водоемов и поверхности почв». Название статьи может быть: «Механизмы выброса метана при замерзании водоемов и поверхности почв в осенне-зимний период».

Тема исследований актуальна. Как отмечает автор, исследование механизма выбросов метана в период замерзания осенью важно не только с точки зрения экологии и экосистемы, но и для того, чтобы разработать адекватные меры мониторинга профилактики и управления климатическими рисками. Метан является одним из катализаторов парникового эффекта. Метан имеет глобальный парниковый потенциал, который в среднем в 28–34 раза превышает показатели углекислого газа. Водоемы, особенно в северных широтах, являются существенными источниками эмиссии и выброса метана. В связи с этим, актуальным является изучение факторов, влияющих на интенсивность выбросов этого парникового газа, изучение физико-химических процессов, происходящих в период замерзания водоемов и поверхности почв осенью, оценка влияния температуры и других условий на выделение метана.

Методология исследования основана на применении методов обзора литературных источников, сравнительного метода, метода визуализации и синтеза научных данных.

Научная новизна исследований в статье не представлена. Однако автор утверждает, что «проблемой данного исследования является то, что полностью механизмы выброса метана при замерзании не до конца изучены». Поэтому, следует предполагать, что данные исследования могут иметь элементы новизны.

Стиль статьи – научный. Объем статьи выдержан. Структура статьи не соответствует требованиям журнала. К сожалению, в статье не представлены результаты собственных исследований автора. В тексте статьи имеются неточности и опечатки. Например в абзаце «Одним из катализаторов парникового эффекта является метан (CH₄), который в том числе из естественных экосистем, таких как водоемы и почвы», видимо, пропущены слово и союз: «который...выделяется...в том числе.. и... из естественных экосистем».

Считаем, что в русскоязычной статье цитирование источников должно быть представлено только на русском языке, чтобы соблюдался единый языковой стиль. В тексте автор приводит цитату из 2-го источника на английском языке: «All global modelled pathways that limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot, and those that limit warming to 2°C (>67%), involve rapid and deep and, in most cases, immediate greenhouse gas emissions reductions in all sectors this decade. Global net zero CO₂ emissions are reached for these pathway categories, in the early 2050s and around the early 2070s, respectively. (high confidence)». Желательно было бы представить русский перевод данной информации.

Библиография статьи очень объемная, включает 31 литературный источник. Все они исключительно на иностранном языке. Российскими учеными данная проблема также изучается, поэтому целесообразно было бы сослаться и на их результаты исследований. Выводы в статье не конкретизированы, имеют обобщенный характер. Не допустимо ссылаться в выводах на рисунки в статье: «Основным итогом данного исследования является визуализация механизма метановых выбросов при замерзании, представленная на рис. 1. Данный рисунок отражает суть выбросов большого количества CH₄ из-за рассмотренных выше факторов...».

Последний абзац заключения: «В исследовании подчеркивается, что в качестве примера учеными было взято сильное землетрясение, однако сам метод, представленный в этом исследовании, может быть использован для дистанционного сейсмического мониторинга...» не имеет отношения к теме исследования.

Заключение статьи необходимо доработать.

Данная статья может быть опубликована в журнале «Арктика и Антарктика» только после доработки.

Результаты процедуры повторного 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, изучение механизмов выброса CH₄ при замерзании поверхности водоемов и поверхности почв с определением факторов, влияющих на интенсивность выбросов CH₄, изучением физико-химических процессов, происходящих в период замерзания, оценкой влияния температуры и других условий на выделение CH₄.

Методология исследования, исходя из анализа статьи можно сделать вывод о том, что автором статьи использовался метод анализа литературных источников, метод обобщения и конспектирования, составление реферативного литературного обзора.

Актуальность затронутой темы безусловна и состоит в получении информации о эмиссии метана CH₄ в атмосферу, что увеличивает риск всех опасностей и негативных последствий для жизни на Земле при изучении всех возможных смоделированных ситуациях

Научная новизна заключается в попытке автора использовать анализ методов

исследования содержания метана для решения глобальных экологических и климатических проблем.

Стиль, структура, содержание стиль изложения результатов достаточно научный. Статья снабжена богатым иллюстративным материалом, отражающим механизм выброса метана при поверхностном замерзании водоема, разработанный автором, хотя, на наш взгляд, схема мало информативна, обща, не обладает новизной. Рис. 3. Результат отображения данных эхолота [18] и Рис. 2. Показатели воздействия на окружающую среду в программе Solidworks (источник — сайт Solidworks) заимствованы.

Примененный автором метод литературного обзора не полон, не содержит ссылок на нормативно-правые источники. Автору статьи следовало бы выделить разделы статьи обсуждение результатов и выводы для лучшего восприятия, указав целевую установку, задачи.

Не совсем относится к предмету исследования автора приводимый автором статьи Сводный отчете МГЭИК, где отмечается, что причина глобального потепления на 1,1°C в 2011–2020 гг. в сравнении с периодом 1850–1900 гг. стала хозяйственная деятельность человека [2]. существующие точки зрения на причины изменения погодно-климатических условий указывают и на действие естественных факторов среды. При этом сам автор констатирует «Одним из катализаторов парникового эффекта является метан (CH₄), который выделяется в том числе из естественных экосистем, таких как водоемы и почвы». Следует отметить использование понятие катализатор в данном контексте неуместен В связи с тем, что метан являясь парниковым газом осуществляет непосредственное воздействие на изменение отражающей способности атмосферы , поглощая длинную новую радиацию.

Статьи констатируются, что в статье приводится «...программы для оценки воздействия на окружающую среду, для проведения термического анализа, а также для трехмерного моделирования проектов и картографических исследований». На самом деле это не так. Библиография не исчерпывающая для постановки рассматриваемого вопроса, не содержит ссылки на нормативно-правовые акты.

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

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