

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

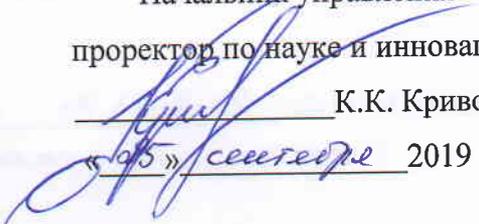
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

«Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова»

УДК 581.13:630*187:551.34

УТВЕРЖДАЮ

Начальник управления -
проректор по науке и инновациям


К.К. Кривошапкин

«05» сентября 2019 г.

ОТЧЕТ

по научно-исследовательскому проекту

«Особенности биогеохимического круговорота веществ в криолитозоне, как один из
механизмов определяющих глобальное изменение климата»

(годовой)

Соглашение № 6-11

Международный научно-образовательный центр

по биогеохимии и климатологии BEST

при Институте естественных наук СВФУ,

д-р.биол.наук, директор

 05.09.2019 Т.Х. Максимов
(подпись, дата)

Якутск 2019

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы (0,5 ст.)

д-р биол. наук

 06.09.2019

подпись, дата

Т.Х. Максимов
(введение, раздел 1-2,
заключение)

Отв. исполнители темы:

Вед. науч. сотр. (0,5 ст.)

канд. геогр. наук

 06.09.2019

подпись, дата

А.Н. Федоров
(раздел 2)

Ст. науч. сотр.

канд. соц. наук

 06.09.2019

подпись, дата

Ю.И. Жегусов
(раздел 2)

Ст. науч. сотр.

канд. соц. наук

 06.09.2019

подпись, дата

С.М. Ксенофонтов

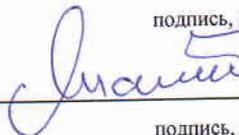
Науч. сотр.

 06.09.2019

подпись, дата

С.В. Карсанаев
(раздел 2)

Вед. инженер

 06.09.2019

подпись, дата

М.Т. Максимов

Инженер (0,5 ст.)

 06.09.2019

подпись, дата

Е.В. Старостин

РЕФЕРАТ

Отчет 26 стр., 3 рис., 4 табл., 13 источников, 2 прил.

КРИОЛИТОЗОНА, КЛИМАТ, ЛЕСОТУНДРА, ЦИКЛ УГЛЕРОДА, МЕТАН.

Цель исследования – изучение круговорота биогеохимических веществ в репрезентативных мерзлотных лесных и лесотундровых экосистемах Северо-Восточной Сибири.

В промежуточном отчете представлены результаты исследований 2019 года по изучению биогеохимического цикла углерода в лесотундре в якутском секторе криолитозоны. Произведен анализ современного состояния климата, выявлены биогеохимические особенности лесотундровых экосистем Северо-востока Якутии, оценены потоки парниковых газов (углекислого газа и метана).

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1 Исследования баланса углерода в лесотундровых экосистемах России	8
2 Описание района исследований и климатических условий	10
3 Влияние климата на экосистемы.....	12
3.1 Экстремальные наводнения в Северо-Восточной Сибири.....	12
4 Сравнительная характеристика круговорота углерода в мерзлотных экосистемах на Северо-Востоке России и их связь с климатическими изменениями	14
4.1 Применение открытой системы измерения потоков метана в Восточной Сибири	14
4.2 Взаимосвязь между параметрами древесного кольца и лесными потоками углерода в лиственничном лесу	15
4.3 Оценка выбросов метана с помощью картирования растительности в таежно-тундровой границе Северо-Восточной Сибирской низменности.....	16
4.4 Потенциал окисления метана в арктических водно-болотных почвах в таежно-тундровой экотоне Северо-восточной Сибири.....	17
4.5 Адаптация ив в низменностях рек к наводнениям при Арктическом усилении: данные по содержанию азота и динамике стабильных изотопов	18
Заключение.....	20
Список использованной литературы	22
Приложение А.....	24
Приложение Б	26

ВВЕДЕНИЕ

Наземные экосистемы высоких широт составляют примерно четверть поверхности Земли, занятой растительностью. За вторую половину XX века в районах высоких широт произошло существенное потепление климата, которое влияет на структуру и функционирование наземных экосистем данного региона.

Почти 65% сибирских лесов и 23 % арктической тундровой растительности произрастают в зоне многолетней мерзлоты. По нашим оценкам, углеродные запасы в почвах лесных и тундровых экосистем в Якутии (3,1 млн. кв. км) оцениваются в 17 млрд. тонн (всего 125,5 млн. га леса и 37 млн. га тундры), что составляет около 25% всего запаса углерода в лесных почвах Российской Федерации.

Территория Северо-Восточной Сибири, занимающей значительную часть пространства Севера, играет важную роль в климатической системе планеты и является свободным резервом биосферы в пределах Единого циркумполярного экологического пространства. Предполагается, что при глобальном потеплении климата именно в этом регионе рост температуры будет наибольшим, и ответное воздействие криосферы на атмосферу может быть более значительным, чем где-либо. Здесь представлены все основные биотические и абиотические компоненты Севера, дающие отклик на изменения климата: Северный Ледовитый океан, многолетняя мерзлота, северная граница лесов, северные и арктические популяции растений и животных.

С конца XIX века зимние температуры воздуха в Северо-Восточной Сибири повысились на 10°C, а средние годовые – на 2,0–3,5°C [1]. Направленное потепление наиболее заметно проявилось здесь во второй половине XX в., особенно с 70–80-х гг. За последние 50 лет в Якутии средняя температура воздуха в январе возросла на 7° С, т.е. в 1,5–2,0 раза интенсивнее, чем в первой половине столетия. Средняя годовая температура воздуха повысилась на 1,0–2°C.

При возможном потеплении климата сумма активных температур в таежной зоне Северо-Восточной Сибири увеличится от 400 до 600°C, а в тундровой – и более того [2], что окажет существенное влияние на составляющие водного баланса. В связи с этим обсуждаются два сценария развития событий: первый – потепление не будет сопровождаться увеличением количества осадков и приведет к аридизации территорий; второй – произойдет компенсационное увеличение количества осадков: в Центральной Якутии незначительное – на 30 мм в год; в северных тундровых районах – на 60 мм [2]. В последнем случае скорость продвижения лиственницы в тундру может приблизиться к 80 м/год [3-5]. Для некоторых пород деревьев скорость перемещения может составить 200–

300 м, а для пионерных – 500 м и более в год [6]. В связи с потеплением климата бурно дискутируется проблема изменчивости биоразнообразия и скорости адаптации растений к новым условиям произрастания. Наряду с возможным сокращением ареала отдельных видов растений, ожидается продвижение к Северу тропических видов с С4-типом фиксации углерода со специфическими морфологическими, физиологическими и биохимическими признаками.

Повышение средней годовой температуры воздуха в области развития криолитозоны способно вызвать активизацию биогеохимических процессов, ускорить высвобождение законсервированных в вечной мерзлоте парниковых газов. Вместе с тем, вклад мерзлотных экосистем в глобальный и континентальный баланс воды, углерода и азота до сих пор остается малоизученным. В связи с принятием Восточно-сибирских Мега-проектов, связанных со строительством железной дороги, нефте- и газопроводов, ГЭС и разработкой Программы социально-экономического развития Арктической зоны Российской Федерации до 2020 года прогнозируется широкомасштабная нарушение мерзлотных экосистем в Якутии, которая может привести к деградации громадного ледового комплекса.

Оценка величины поглощения углерода мерзлотными экосистемами имеет прямой экономический выход в рамках ратификации Российской климатической доктрины, Киотского и Парижского Протоколов ООН по смягчению последствий изменения климата и адаптации глобальному изменению климата - удержание прироста глобальной средней температуры к концу XXI века в пределах «намного ниже» 2°C сверх доиндустриальных показателей (конец XIX — начало XX века) и стремление добиться ограничения роста температуры на уровне 1,5°C. Поглощение углерода экосистемами может использоваться для подсчета индустриального выброса отдельно взятой страны. Любая добавочная верифицированная поглотительная емкость может быть продана в рамках торговли эмиссией. В конечном счете, легкоранимые мерзлотные экосистемы Восточной Сибири должны быть выведены в устойчивое русло развития в соответствии с функционированием социальной, экономической и экологической систем.

Для количественного прогноза изменения баланса воды, тепла и углерода в мерзлотных экосистемах Северо-Восточной Сибири при глобальном изменении климата необходимы многолетние измерения аккумулирующей способности экосистем криолитозоны на международных научных станциях, а также разработка адекватных моделей регионального и глобального баланса тепла, воды и углерода в растительных сообществах.

Уникальным элементом данного проекта является то, что исследования проводятся на двух репрезентативных научных станциях SakhaFlux ИБПК СО РАН и ИЕН СВФУ: лесная научная станция «Спасская падь», Центральная Якутия, 62° с.ш., и лесотундровая научная станция «Кодак», Северо-Восточная Якутия, 69° с.ш.. совместно с российскими и зарубежными учеными.

Учитывая значительное уменьшение аккумуляции углекислоты в засушливые годы и повышенную частоту лесных пожаров в такие периоды, можно с большой уверенностью говорить о существенном изменении баланса в круговороте углерода и воды в мерзлотных экосистемах при прогнозируемом потеплении климата [7].

Цель исследования - исследование круговорота биогеохимических веществ в репрезентативных мерзлотных лесных и лесотундровых экосистемах Северо-Восточной Сибири. Будут поставлены следующие задачи:

1. Исследование сезонных вариаций в циклах энергии, воды, углерода и азота, и их внутригодовая изменчивость;

2. Оценка региональных и континентальных потоков энергии, воды, азота, углерода (CO₂ и метан), и взаимосвязь между наземными процессами и атмосферными условиями.

В 2018-2019 гг. исследования проведены в лесотундровой экосистеме, научная станция Кодак, правый берег р. Индигирка, Северо-восточная Якутия, 69°с.ш., 150° в.д. (в 20 км восточнее п. Чокурдах).

1 Исследования баланса углерода в лесотундровых экосистемах России

Первым крупномасштабным мероприятием по изучению продуктивности наземных экосистем севера Евразии, включая Российский сектор криолитозоны являлась Международная биологическая программа (МБП) 1964 – 1974 гг. В основе МБП лежала концепция «биогеоценоза», разработанная в 1964 году академиком Владимиром Николаевичем Сукачевым. Тогда исследования проводились комплексно с охватом всей совокупности однородных природных явлений на определённой территории, имеющей свою специфику взаимодействия и взаимосвязей между составляющими её компонентами и имеющей определенный тип обмена веществом и энергией между своими компонентами и окружающей средой. Исходя из этого, изучение продукционных процессов того периода основывалось на обобщении информации о величине чистой первичной продуктивности, запасах органического вещества почвы, объеме фитомассы и т.д. Эмпирические данные полученные в результате десятилетних исследований были собраны и обобщены в единую базу данных из них были составлены базы данных биологической продуктивности тундровых и лесных биогеоценозов высоких широт, что на прямую связано с оценкой количества углерода в экосистемах.

По результатам вычислений основанным на данных МБП и других источников Карелиным и др. [8] была получена одна из первых оценок запаса углерода в живой фитомассе лесных и тундровых районов России равная 2 735,34 млн.т. (2,735 Гт), что составляет 34,2% от мирового запаса углерода в живой фитомассе. Общая площадь исследованных экосистем составила 283,5 млн.га., таким образом запас углерода с одного гектара равен 9,65 тонн углерода.

Карелин и др. [8] в своей оценке запаса углерода, рассчитанной по методике Кобака К.И., опирались на содержания углерода в 1 кг сухого органического вещества в размере 0.45 кг. Территориально данная оценка покрывала бореальные зоны от Кольского полуострова до Чукотско-Анадырьской провинции. Якутская провинция по данным Карелина и др. (1994) содержала в живой фитомассе 416,43 млн.т С на общей площади в 47,57 млн.га или 9,61тС/га. Первичная продукция биогеоценозов Якутской провинции составляла 1,38 тС/га в год.

Подобная оценка запаса углерода была проведена Честных и др. [9] по их результатам суммарный запас углерода в тундровых и лесотундровых регионах России составлял 28,6 ГтС для площади 279 млн.га. При этом максимальные запасы углерода приходятся на регионы Средней Сибири и Чукотско-Анадырьской провинции и составляют 8,6 – 4,7 ГтС соответственно. Минимальные значения отмечаются в

арктических пустынях Кольского полуострова и Полярном Урале – 0,7 – 0,4 ГтС соответственно [9] (Таблица 1).

Таблица 1 – Средние и общие запасы углерода в органическом веществе почвы для тундровой зоны России в целом и её регионах

Регион	Площадь		Средний, тС га ⁻¹	Общий	
	10 ⁶ га	%		10 ⁶ т С	%
Восточно-Европейская провинция	27.39	9.8	177.5±71.1	4863±1948	17.0
Полярный Урал	3.74	1.3	104.2±31.9	390±119	1.4
Острова Баренцева и Карского морей	12.54	4.5	18.4±1.5	230±18	0.8
Западная Сибирь	39.01	14.0	91.5±19.2	3598±751	12.5
Центральная Сибирь	91.15	32.7	94.3±25.7	8598±2341	30.0
Якутская провинция	47.57	17.1	108.7±30.7	5173±1460	18.1
Острова морей Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского	4.50	1.6	75.1±12.0	338±54	1.2
Чукотско-Анадырская провинция	46.80	16.8	101.2±38.4	4738±1799	16.6
ИТОГО	278.89	100	102.6±31.3	28619±8729	100

Средний запас углерода, полученный в работе [10] был сопоставлен с литературными данными по вариативности средних запасов углерода в тундровой зоне полученными Кобак К.И. [11] в 1988 для Российских тундровых биогеоценозов и с данными для тундровой зоны Аляски:

- Честных и др. [9, 10] – 23 – 321 т С/га;
- Кобак [11] – 50 – 200 т С/га;
- Alexander at al. [11] – 142 – 324 т С/га.

Разброс оценок объясняется использованием различных карт для оценки площадей природных зон [12]. Так, данные полученные при анализе материалов МБП и методах сопоставления этих данных с картографическими данными определяли количество углерода в тундровых экосистемах лишь с точность порядка 10^2 - 10^3 гСм⁻², что по мнению Замолодчикова [13] не отражает действительного общего количества углерода в тундровой зоне России.

2 Описание района исследований и климатических условий

Район исследований располагался в 140 км к югу от Северного Ледовитого океана на Индигирской низменности Северо-Востока Якутии. Основными природными зонами данного региона являются тундры и лесотундры на южной границе района.

Наблюдения за биогеохимическими процессами велись на станции «Кодак» (69°49'44.9" с.ш., 146°29'39.4" в.д., высота над уровнем моря 48 м), которая входит в региональную мониторинговую сеть SakhaFluxNet.

В районе исследований, пойма на 50 метров ниже уровня моря и имеет протяжённость 5 – 20 км от берега реки Индигирка. В ландшафте отложения ледового комплекса были представлены в виде холмов разных размеров высотой до несколько десятков метров выше поймы. Выходы Едомы наблюдались по некоторым берегам рек, обнажая повторно жильные льды с шириной в несколько метров. Многочисленные термокарстовые озера, высохшие озера и повторно жильные ледовые полигоны наблюдались в низовьях водосбора. Толщина сплошной мерзлоты в этой области 400 – 700 метров. Средняя толщина активного слоя колеблется от 0,4 – 0,6 метров на холмах, 0,4 – 0,8 метров в северной тайге, и до 0,4 – 1,0 метров в поймах рек (многолетняя мерзлота - ландшафтный карта ЯАССР, 1991).

Основываясь на данных полученных с метеостанций Чокурдах (ВМО станция № 21946 за 1948 – 2017 гг) и Микрометеорологической вышки находящейся на станции «Чокурдах» (2001 – 2017 гг.) в 28 км к северо-востоку от п. Чокурдах климат исследуемой территории характеризуется как континентальный с холодной зимой и коротким теплым летом. Средняя температура января составляла $-34,2^{\circ}\text{C}$, среднемесячная температура воздуха в июле – $10,4^{\circ}\text{C}$, а среднегодовая температура составляла $-10,5^{\circ}\text{C}$. Но на самой станции за исследуемый период отмечались дни со среднесуточной температурой воздуха ниже -45°C . Станция «Кодак» является одной из самых холодных по сравнению с другими подобными станциями в Арктике. Так среднемноголетние зимние температуры на станциях Скоресбусунд (Северо-Восток Гренландии), Кируна (Север Швеции) и Воркута (Северо-Запад России) варьировались от -13 до -16°C ; относительно холодными являются станции Барроу (Аляска) $-25,4^{\circ}\text{C}$ и станция в дельте реки Лена – -30°C . Но континентальность климата проявлялась и в разности летних температур. Станция «Чокурдах» со средним многолетним значением летних температур $+10,4^{\circ}\text{C}$ теплее чем Барроу ($4,6^{\circ}\text{C}$) и Скоресбусунд ($6,0^{\circ}\text{C}$), но немного прохладнее чем станции Курин и Воркута ($12 - 14^{\circ}\text{C}$). Среднемесячные температуры лета были нестабильными.

На летние температуры оказывает влияние Северный Ледовитый океан, который

расположен в 150 км к северу от района исследований. Участок расположен приблизительно по середине между побережьем океана и верхней границей распространения лесов. Ветер с севера приносил холодные морские воздушные массы, которые понижают температуру воздуха. Когда ветер меняет направление и дул с юга, то тёплые воздушные массы повышали температуру. Перепады температуры в летние месяцы могут достигать 10 - 15°C в течение пары суток в зависимости от направления ветра. Направление ветра так же влияло на количество осадков, большая часть которых выпадала в виде снега. Осадки в виде снега выпадали и в летние месяцы (июнь-август). Годовое количество осадков составляет 220 мм. Снежный покров часто достигал высоты 50-60 см. Таяние снежного покрова начиналось в конце мая – начале июня. Относительно небольшое количество осадков, близкое по значению к аридным зонам, наличие многолетней мерзлоты и низкие летние температуры способствовали избыточной обводненности исследуемого участка в течение всего вегетационного сезона. С момента полного исчезновения снежного покрова до начала вегетационного периода проходило около 2 – 3 недель. Это было связано с тем, что небольшой гумусовый слой почвы требовал времени для накопления солнечного тепла для прогревания верхнего корнеобитаемого слоя. Раскрытие почек у кустарников происходило в конце июня, после повышения температуры воздуха. Суточная динамика валовой первичной продуктивности (GPP) менялся существенно, но в недельном интервале GPP в начале вегетационного сезона меняется незначительно. Вегетационный период длился всего 2 месяца до конца августа – начала сентября. Устойчивый снежный покров формируется во второй декаде сентября, после чего он уже не тает.

3 Влияние климата на экосистемы

3.1 Экстремальные наводнения в Северо-Восточной Сибири

Наводнения являются одним из наиболее серьезных бедствий, оказывающих сильное воздействие на экосистему и средства к существованию местного населения. Ожидается, что частота наводнений увеличится в глобальном масштабе, что сделает оценку рисков актуальной проблемой. Весной - летом (июнь - июль) 2017 г. в низменности реки Индигирка Северо-Восточной Сибири, покрывшей большую площадь водой, произошло сильнейшее наводнение. В этом исследовании масштабы и причины наводнений были определены с использованием результатов полевых наблюдений, спутниковых снимков и наборов данных повторного анализа климата, а также обсуждалось их возможное воздействие на экосистему. Было установлено, что наводнение охватило значительную низменную территорию площадью около 9530 км² и что повышение относительного уровня воды в реке Индигирка по отношению к среднему значению, определенному за период девяти лет, охватывающий период с 2009 по 2017 год, составило около 350 см. Наибольшая годовая максимальная глубина снега (эквивалент снеговой воды:) в низменности наблюдалась в 2017 году за тот же период (2009-2018), а поверхность нижнего течения низменности была частично покрыта снегом даже в конце июня из-за экстремального снегопада, который произошел осенью - зимой 2016 года. Набор данных климатического анализа, полученный для пространственно-временных вариаций снежного покрова, таяния снега и стока над низменностью в течение 2015-2017 гг., показал, что в июне 2017 г. в речную систему попало большое количество талой воды, что привело к сильному наводнению. Последние также привели к переувлажнению большей части деревьев в низменности, что привело к серьезному разрушению экосистем и изменениям в круговороте веществ в изучаемом регионе.

3.2 Общественное восприятие изменения климата в Республике Саха (Якутия)

В исследовании были объединены методы климатических и социологических исследований и проведен анализ, при котором сравнили данные метеонаблюдений, а также измерений и модельных расчётов различных объективных индикаторов изменения климата и окружающей среды холодных регионов с результатами анкетирования населения по этим вопросам. Всего анкетным опросом на основе квотной пропорциональной выборки было охвачено 2000 респондентов, что обеспечило

достаточную репрезентативность результатов исследования. Также в исследовании были применены качественные методы – глубинные интервью и фокус-группа.

Проведенный опрос показал, что изменение температуры наиболее заметны в зимний период, на это указали 70% респондентов. В свою очередь, около половины опрошенных отмечают похолодание лета (Таблица 2). Респонденты считают, что зимы в Якутии стали ощутимо теплее, если раньше экстремально низкие температуры (-50 °С и ниже) держались продолжительное время в декабре-январе, то сейчас они неустойчивы, сменяются резкими потеплениями. Летом отмечается уменьшение продолжительности жаркого периода из-за частых дождей и облачных дней.

Таблица 2 – Восприятие изменений температур зимнего и летнего периодов

	Холоднее	Не изменилась	Теплее	н/о
Зима стала	16,3	11,3	70,0	2,4
Лето стало	47,8	24,0	26,7	1,5

Исследования показали, что происходящие изменения климата и окружающей среды в Якутии фиксируются общественным сознанием и уже оказывают воздействие на многие традиционные виды деятельности, условия труда и отдыха населения. Респонденты отмечают потепление зимы и похолодание лета. Происходящие изменения влияют на повседневную жизнь и часто не лучшим образом. Исследование позволило установить высокий уровень тревожности относительно возникновения чрезвычайных ситуаций, обусловленных изменением климата и окружающей среды, причём подавляющее большинство жителей Якутии к ним не готовы.

4 Сравнительная характеристика круговорота углерода в мерзлотных экосистемах на Северо-Востоке России и их связь с климатическими изменениями

4.1 Применение открытой системы измерения потоков метана в Восточной Сибири

Измерение потока метана (CH_4) в масштабе полога лиственничного леса в Восточной Сибири проводилось методом вихревой ковариации с использованием газоанализатора CH_4 открытого типа (Рисунок 1). Хотя не скорректированный поток показал сильное поглощение CH_4 в дневное время, он изменился на эмиссию CH_4 после того, как плотность и спектроскопические эффекты были исправлены. Случайные ошибки, рассчитанные по кросс-ковариационным функциям, позволяют предположить, что поток CH_4 был почти таким же, как верхняя граница предела обнаружения потока на 95-м процентиле, и он едва разрешался измерительной системой; и что большая часть дневного потока CH_4 оставалась положительной даже после того, как неопределенности из-за случайных ошибок потока были приняты во внимание.

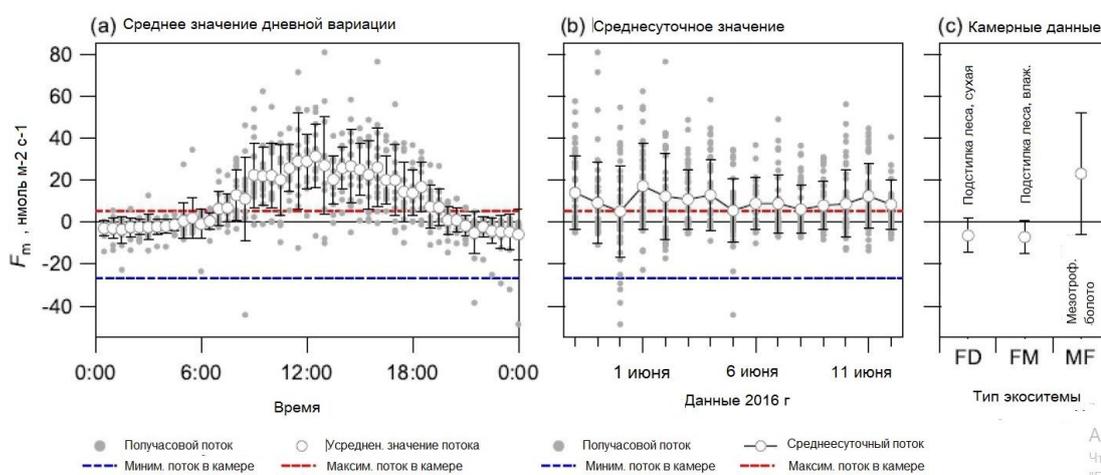


Рисунок 1 – Дневная вариация ансамблевого среднего F_m (a) и среднесуточного F_m (b) потока метана, а также данные с использованием статических камер (c) по van Huissteden et al.(2008).

Поток CH_4 демонстрировал четкие суточные колебания, представляющие выбросы в дневное время и почти нулевые в ночное время, независимо от направления ветра. Это суточное изменение было в основном объяснено атмосферной стабильностью и скоростью трения. Предполагалось, что накопление CH_4 в воздушной колонне под вихревой ковариационной системой играет важную роль в суточном изменении потока CH_4 вместе с вкладом влажного участка около измерительной вышки в качестве источника CH_4 . Поток

CH₄ с 29 мая по 12 июня был рассчитан как чистая эмиссия 5,1 – 17,2 ммоль м⁻²с⁻¹ в среднем за день, в диапазоне между лесной подстилкой и мезотрофным болотом вблизи этого участка, измеренным стационарными камерами в предыдущем исследовании.

4.2 Взаимосвязь между параметрами древесного кольца и лесными потоками углерода в лиственничном лесу

Индекс ширины древесного кольца (RW) и спутниковые индексы растительности, такие как нормализованная разностная растительность. Индекс (NDVI), используются в качестве долгосрочных показателей прошлого поглощения углерода лесами. Однако, фундаментальные вопросы остаются в отношении того, что представлено RW и NDVI на экосистемном уровне. Для решения этого вопроса мы сравнили параметры древесного кольца (RW и отношение изотопов углерода: δ¹³C) и продуктов NDVI с лесной экосистемой (Таблица 3).

Таблица 3 – Связь между NDVI (вегетационный индекс) и параметрами годичных колец в течение 2004-2018 гг.

NDVI (вегетационный индекс)	Параметры годичных колец	Период (время)	NDVI (вегетационный индекс) в месяц						
			Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Июнь - Август	Май - Сентябрь
GIMMS-NDV13g	RWI	Нет	0.28	-0.25	0.31	0.42	-0.06	0.20	0.36
		Один год	0.21	0.72*	0.44	-0.13	-0.59	0.77 *	0.49
	δ ¹³ C	Нет	-0.17	0.15	-0.10	-0.50	0.17	-0.16	-0.18
		Один год	-0.12	-0.43	0.71*	0.40	0.61	-0.65	-0.31
MODIS-NDVI	RWI	Нет	0.50	0.38	-0.46	0.20	-0.15	0.06	0.21
		Один год	0.47	0.21	-0.08	-0.18	0.25	-0.06	0.35
	δ ¹³ C	Нет	-0.45	-0.23	0.26	-0.47	0.34	-0.29	-0.21
		Один год	-0.09	-0.30	-0.54	-0.01	-0.46	-0.49	-0.62*

Значимые соотношения (p < 0,05) обозначены *

Временной лаг: Нет и один год указывают на сравнение параметров годичных колец с NDVI в текущем и предыдущем году соответственно

Потоки CO₂, оценены с использованием метода вихревой ковариации, в лиственничном лесу в Восточной Сибири. RW и δ¹³C в древесном кольце хорошо коррелировали с валовой первичной продукцией (GPP) экосистем, и их временная стабильность была высокой в течение 2004-2018 гг.. Однако результаты NDVI не показали каких-либо временных стабильных отношений с GPP. Это может быть отнесено к

существенным изменениям в растительности напочвенного яруса в лесу, т. е., из-за плотных кустов брусники и влагостойких трав, из-за чрезмерно влажной окружающей среды в течение 2007-2018 гг.. Изменения в заниженная растительность может быть отражена продуктами NDVI, но не GPP. Результаты наших исследований показывают, что более целесообразно изучать поглощение углерода лесами с использованием параметров древесного кольца, чем с использованием спутниковых индексов растительности в лиственных лесных экосистемах преобладающих в Восточной Сибири.

4.3 Оценка выбросов метана с помощью картирования растительности в таежно-тундровой границе Северо-Восточной Сибирской низменности

Таежно-тундровые пограничные экосистемы подвержены влиянию изменения климата. Выбросы метана (CH₄) в таежно-тундровых экосистемах редко оценивались на местном и региональном уровнях. Мы связали *in situ* потоки CH₄ (с 2009 по 2018 гг.) с растительным покровом и масштабировали полученные данные для оценки выбросов CH₄ в масштабе (10×10 км) с использованием спутниковых изображений высокого разрешения (Индибирская низменность, Северо-Восточная Сибирь). Мы определили девять классов растительности, содержащих 71 вид, из которых 16 были доминирующими. Индибирская низменность была покрыта густыми кустарниковыми зарослями ивы и водно-болотными угодьями с преобладанием осоки и редкими лиственными лесами (Таблица 4). Выбросы CH₄ в водно-болотных угодьях были высокими. Озера и реки были источниками CH₄, в то время как лесные подстилки были в основном нейтральными с точки зрения выбросов CH₄. Оценочные локальные выбросы CH₄ (37 мг м⁻² день⁻¹) были выше, чем те, о которых сообщалось в аналогичных исследованиях.

Выбросы метана в локальном масштабе были рассчитаны с использованием наблюдаемого потока CH₄, а площадь каждого класса растительности получена из карты растительности. Поток CH₄ *in situ* (всего 230 наблюдений), исследование проводили с 3 июля по 9 августа 2009–2018 гг. Водно-болотные угодья с преобладанием осоки составляют 70% от общего объема выбросов.

Наши результаты показывают, что: а) осока и возникающие водно-болотные экосистемы выступают в качестве горячих точек для выбросов CH₄, и б) разреженное покрытие деревьев не регулирует местные выбросы CH₄ и баланс. Таким образом, рост и распространение лиственницы изменятся с изменением климата в будущем и не будут способствовать снижению местных выбросов CH₄.

Таблица 4 – Выбросы метана CH₄ в таежно-тундровых пограничных экосистемах Индигирской низменности

Виды	Площадь покрытия (км ²)	%	Усредненный поток CH ₄ (мг \м ⁻² день ⁻¹) ^a	SE	N	D	Расчетная локальная эмиссия CH ₄ (106 г CH ₄ в месяц ⁻¹)	CH ₄ %
Ивы	26	27	0.3	0.3	17	5	0.3	0.2
Осоки	22	23	114	11	90	36	78	70
Речные	14	15	2.6 ^b	0.3	18	2	1.1	1.0
Новые виды	9.2	9.5	96	29	14	4	27	25
Кустарник	8.0	8.3	0.8	0.7	8	3	0.2	0.2
Наземные	6.8	7.0	-3.4	2.2	7	2	-0.7	-0.6
Озерные	4.6	4.8	25	3.4	3	2	3.6	2.8
Древесные	4.0	4.1	- 0.1	0.2	49	23	0.0	0.0
Сфагнум	1.8	1.9	38	8.9	24	17	2.2	1.9
Общее	96		37 ^c	9.8	230	94	111	

^a Поток метана наблюдается при расчете средних камерно-измеренных значений. Приведенные данные являются средними ± Стандартная ошибка (SE), с повторным числом измерений общего потока (N) и дней наблюдения (D);

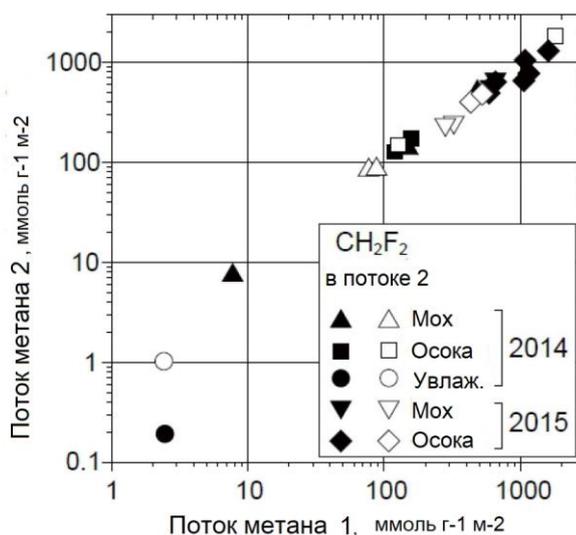
^b Движущий поток метана оценивали по концентрации растворенного в реке CH₄ и скорости переноса ;

^c Локальный поток CH₄ на квадратный метр в сутки (мг CH₄ м⁻² день⁻¹)

4.4 Потенциал окисления метана в арктических водно-болотных почвах в таежно-тундровой экотоне Северо-восточной Сибири

Арктические водно-болотные угодья являются значительными источниками атмосферного метана и усиление изменения климата в Арктике может привести к изменению динамики метана, где окисление метана будет ключевым процессом для контроля выбросов метана из заболоченных земель (Рисунок 2). В этих исследованиях мы определяли потенциальную скорость окисления метана в 5-ти водно-болотных почвах в переходной зоне тайга-тундра в Северо-Восточной Сибири. Образцы грунта были отобраны летом из впадин с осоковыми кочками и *Sphagnum spp.* и из курганов, поросших мхом и лиственницами. Инкубационный эксперимент показал, что образцы почв, собранные из депрессий - зоны с преобладанием мхов и осоки демонстрировали активное окисление метана без запаздывания по времени. Потенциальные скорости окисления метана при 15 °C варьировались от 94 до 496 нМ ч⁻¹ г⁻¹ сухой массы. Окисление метана наблюдалось на всех исследуемых глубинах (0-40 см), включая водонасыщенные аноксические слои. Максимальная скорость окисления метана была зафиксирована в слое выше водонасыщенного: в поверхностном слое (0-2см) в зоне с доминированием осоки и в среднем слое (4-6 см) в зоне доминирования мха. Скорость окисления метана была температурно-зависимой, так пороговая температура окисления метана оценена от -4 до -11 °C, что предполагает окисление метана при отрицательных температурах. Образцы

почв, собранные из замерзшего слоя сфагнового торфа, также показали заметное потребление метана при инкубации 15 °С. Современные результаты свидетельствуют о том, что 20 метанооксиляющих бактерий в водно-болотных почвах сохраняют свою потенциальную активность даже при условиях аноксии и промерзания, заметно используя метан при благоприятных условиях. С другой стороны, ингибитор окисления метана не влияет на поток метана из осоковых и моховых зон *in situ*, что указывает на незначительную роль окисления метана, связанного с растениями.



Поток метана 1 - измерение без CH₂F₂; Поток метана 2 - измерение после впрыска с или без CH₂F₂.

Рисунок 2 – Влияние дифторметана (CH₂F₂) на поток метана из водно-болотных угодий

4.5 Адаптация ив в низменностях рек к наводнениям при Арктическом усилении: данные по содержанию азота и динамике стабильных изотопов

С ростом глобального потепления частые и сильные речные паводки в арктических регионах отрицательно сказались на распространении ив в речных низменностях. Чтобы исследовать влияние наводнения, особенно заболачивания, на условия содержания азота для ив, мы измерили содержание внекорневого азота и изотопный состав ($\delta_{15}\text{N}$) в ивах *Salix boganidensis*, *S. glauca* и *S. pulchra* при различных гидрологических условиях (т. е. сухом, влажном, при заболачивании [WL] и при длительном заболачивании [LWL]) в Северо-восточной Сибири (Рисунок 3).

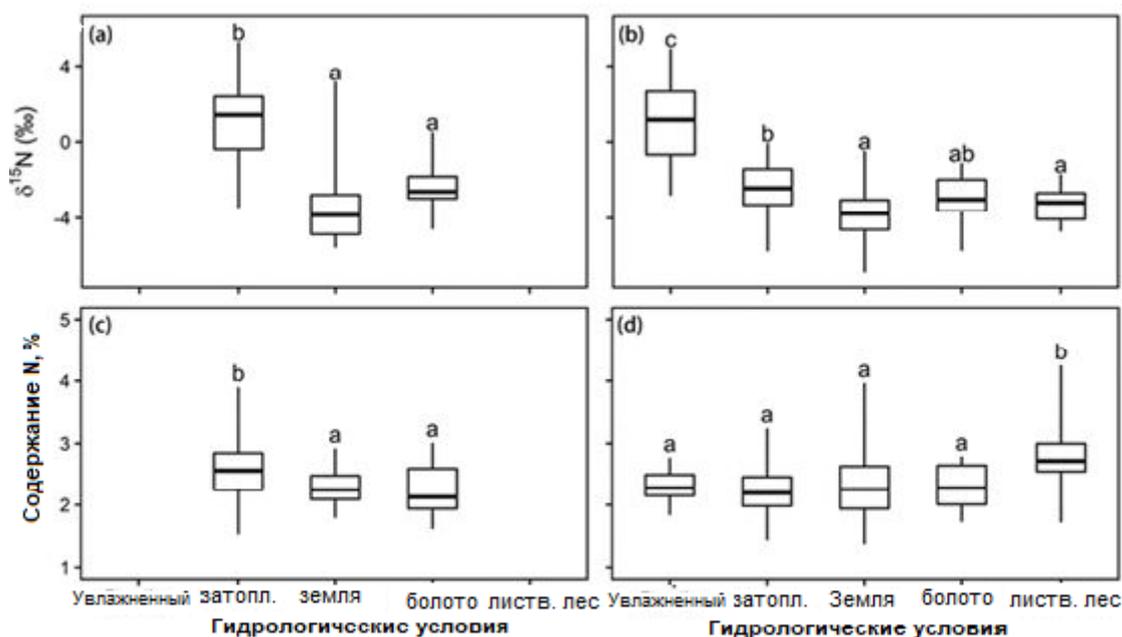


Рисунок 3 – Статистический анализ по значениям изотопа азота $\delta^{15}\text{N}$ листвы (‰) для пяти различных гидрологических условий при выборочном снимке в 2017 году (a) и 2018 (b) и аналогичные графики для содержания азота в листьях (%) в 2017 году (c) и 2018 (d).

Различные буквы над цифрами указывают на статистически значимые различия в соответствии с проведенным специальным тестом и линейной смешанной моделью

Большое изменение было обнаружено в содержании внекорневого азота (от 1,4 до 4,2%) и значении $\delta^{15}\text{N}$ (от -6,8 до 5,3 ‰) в ивах в различных гидрологических условиях. В целом, увеличение значений $\delta^{15}\text{N}$ листвы от внутреннего ареала к берегу реки коррелирует с увеличением уровня азота в почве с WL. Напротив, низкое содержание внекорневого азота в LWL показало снижение поглощения азота у ив в условиях LWL, что в значительной степени согласуется с низкой активностью фиксации углерода, о которой сообщалось в предыдущем исследовании. Эти результаты свидетельствуют о том, что ивы предпочитают WL, чем LWL, поскольку последние снижают фотосинтетическую активность ив. Интересно, что после LWL большое количество ив выжило в густых отложениях и имело высокое содержание внекорневого азота, в то время как конкурирующие виды (например, лиственница) не выжили. Основываясь на этих результатах, мы прогнозируем, что распространение ив в прибрежных районах Арктики будет расширяться под LWL во время арктического усиления в ближайшем будущем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В промежуточном отчете представлены результаты исследований 2019 года по изучению биогеохимического цикла углерода в лиственничном лесу в якутском секторе криолитозоны. Произведен анализ современного состояния климата, выявлены биогеохимические особенности лесотундровой экосистемы Северо-восточной Якутии.

За последние десятилетия в Якутии отмечается заметное потепление климата. Наибольшее повышение температуры воздуха в регионе произошло в 1980-е годы. С середины 1990-х годов потепление климата в некоторых районах Якутии явно приостановилось, но среднегодовые температуры воздуха остаются на прежнем высоком уровне. Тренды в целом за период 1966-2009 гг. заметно уменьшились по сравнению с периодом 1966-1995 гг.

Атмосферные осадки на данном этапе исследования не изменили общую картину, которая наблюдалась за последние 100 лет. Отмечается большая изменчивость, как в годовых, так и в летних суммах осадков от года к году, но четкой тенденции к их понижению или повышению не отмечается. Характеристики снежного покрова в Якутии в период 1966-2009 гг. в целом оставались на уровне многолетних средних. Нет явной тенденции увеличения или уменьшения высоты и продолжительности залегания снежного покрова. Сроки образования и разрушения устойчивого снежного покрова находятся в пределах естественной изменчивости. В тоже время в некоторых пунктах в последние годы усилилась межгодовая изменчивость отдельных характеристик снежного покрова.

Повышение температуры грунтов в первой половине 1980-х и в начале 1990-х годов вызвало существенные изменения антропогенных мерзлотных ландшафтов, в первую очередь в открытых местностях. Активизировались криогенные процессы, особенно в ранее сформированных термокарстовых понижениях. Местами развитие термокарста стало необратимым. Обводнение термокарстовых озер вызвало подтопление и расширение озер.

В температурном режиме естественных лесотундровых ландшафтов изменения произошли, но не достигли критических значений и не вызвали активизацию криогенных процессов. Защитный слой, сформированный после голоценового оптимума, сохраняет свою функцию предохранения от деградации мерзлых пород.

Небольшой гумусовый слой почвы требовал времени для накопления солнечного тепла для прогревания верхнего корнеобитаемого слоя. Раскрытие почек у кустарников происходило в конце июня, после повышения температуры воздуха. Суточная динамика

валовой первичной продуктивности (GPP) менялся существенно, но в недельном интервале GPP в начале вегетационного сезона меняется незначительно.

Результаты наших исследований показывают, что более целесообразно изучать поглощение углерода лесами с использованием параметров древесного кольца, чем с использованием спутниковых индексов растительности в лиственных лесных экосистемах преобладающих в Восточной Сибири.

Выбросы CH_4 в водно-болотных угодьях были высокими. Озера и реки были источниками CH_4 , в то время как лесные подстилки были в основном нейтральными с точки зрения выбросов CH_4 . Оценочные локальные выбросы CH_4 ($37 \text{ мг м}^{-2} \text{ день}^{-1}$) были выше, чем те, о которых сообщалось в аналогичных исследованиях. Наши результаты показывают, что: а) осока и возникающие водно-болотные экосистемы выступают в качестве горячих точек для выбросов CH_4 , и б) разреженное покрытие деревьев не регулирует местные выбросы CH_4 и баланс. Таким образом, рост и распространение лиственницы изменятся с изменением климата в будущем и не будут способствовать снижению местных выбросов CH_4 . Современные результаты свидетельствуют о том, что 20 метанооксиляющих бактерий в водно-болотных почвах сохраняют свою потенциальную активность даже при условиях аноксии и промерзания, заметно используя метан при благоприятных условиях. С другой стороны, ингибитор окисления метана не влияет на поток метана из осоковых и моховых зон *in situ*, что указывает на незначительную роль окисления метана, связанного с растениями.

С ростом глобального потепления частые и сильные речные паводки в арктических регионах отрицательно сказались на распространении ив в речных низменностях. Распространение ив в прибрежных районах Арктики будет расширяться при длительном заболачивании территорий в ближайшем будущем.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Гаврилова М.К. Изменения современного климата области "вечной мерзлоты" в Азии//Обзор состояния и тенденций изменения климата Якутии/Якутск, 2003. – С. 7-17;
- 2 Завельская А.А., Зукерт Н.В., Полякова Е.Ю., Пряжников А.А. Прогноз влияния изменений климата на бореальные леса России//Лесоведение. – 1993. – №3. – С.16-24.
- 3 Hustich I. On the recent expansion of the Scotch Pine in northern Europe//Fennia. – 1958. – V.82. – P. 3-23;
- 4 Keuk G. Zuwachsuntersuchungen in Zusammen hang mit den gegenwartigen Waldschaden in Baben Wurtemberg//Air Pollut and Forest Decline. – Birmensdorf. – 1989. – P. 263-269;
- 5 Величко А.А., Гричук В.П., Зеликсон Э.М., Борисова О.К. К оценке динамики бореальных лесов при антропогенном потеплении климата//Международный Симпозиум «Северные леса: состояние, динамика, антропогенное воздействие"/Москва: Госкомлес СССР. – 1990. – С. 19-29;
- 6 Парниковый эффект, изменение климата и экосистемы. – Л.: Гидрометеиздат. – С. 1989-555;
- 7 Максимов Т.Х. Круговорот углерода в лиственных лесах Якутского сектора криолитозоны//Автореферат докторской диссертации. Красноярск. – 2007. – С. 46.
- 8 Карелин Д.В., Гильманов Т.Г., Замолотчиков Д.Г. К оценке запасов углерода в наземных экосистемах тундровой и лесотундровой зон Российского Севера: фитомасса и первичная продукция // Доклады академии наук. - 1994. - Т. 335, No 4. - С. 530-532.
- 9 Честных О.В., Замолотчиков Д.Г., Уткин А.И. Распределение запаса органического углерода в почвах лесного фонда России // Лесоведение. - 1999.- № 3.- С. 13-21.
- 10 Честных О.В., Карелин Д.В., Замолотчиков Д.Г. Широтные и меридиональные закономерности распределения запасов фитомассы, почвенного органического вещества и первичной продукции наземных экосистем Севера России от Кольского полуострова до Чукотки // Вестник МГУ. Сер. биол. - 1995. - No 3. - С. 47-52.
- 11 Кобак К.И. Биотические компоненты углеродного цикла. Ленинград. Гидрометеиздат, 1988. 253 с.

12 Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г., Гильманов Т.Г. Запасы и продукция углерода в фитомассе тундровых и лесотундровых экосистем в России // Лесоведение, 1995. № 5. С. 29-36.

13 Замолодчиков, Д.Г., Уткин, А.И. Запасы дебриса, его депонирование и разложение в лесном фонде России: результаты расчетов // Межд. конф. Петрозаводск, - 2005. - С. 136-141.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Перечень статей, опубликованных по тематике проекта в 2018-19 гг. в соответствии с
государственным заданием

Публикация статьи в зарубежном рецензируемом журнале, входящим в список WoS и/или Scopus:

1 Kotani A., Saito A., Kononov A.V., Petrov R.E., Maximov T.C., Iijima Y., Yoshihiro., Ohta T. Impact of unusually wet permafrost soil on understory vegetation and CO₂ exchange in a larch forest in eastern Siberia. 2019. *Agricultural and Forest Meteorology*. 265, P. 295-309. DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.11.025. SJR(2017) - 1.818 Q1;

2 Shingubara, R., Sugimoto, A., Murase, J., Iwahana, Tei S., Liang, M., Takano S., Morozumi T., Maximov, T.C., Morozumi, T., Maximov, T.C. Multi-year effect of wetting on CH₄ flux at taiga-Tundra boundary in northeastern Siberia deduced from stable isotope ratios of CH₄. 2019. *Biogeosciences*. 16(3), P. 755-768. DOI: 10.5194/bg-16-755-2019. SJR(2017) - 2.072 Q1;

3 Murphy, M.J., Porcelli, D., Pogge von Strandmann, P.A.E., Maximov, T., Andersson, P.S. Tracing silicate weathering processes in the permafrost-dominated Lena River watershed using lithium isotopes. 2019. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 245, P. 154-171. DOI: 10.1016/j.gca.2018.10.024. SJR (2017) - 2.677 Q1;

4 Morozumi T., R. Shingubara, R. Suzuki, H. Kobayashi, S. Tei, S. Takano, R., Fan, M. Liang, T. C. Maximov & A. Sugimoto Estimating methane emissions using vegetation mapping in the taiga–tundra boundary of a north-eastern Siberian lowland. 2019 *Tellus, Series B: Chemical and Physical Meteorology*. 71(1), P. 1-17. DOI: 10.1080/16000889.2019.1581004. SJR(2017) - 1.203 Q2;

5 Miyamoto Y., Maximov TC, Sugimoto A., Nara K.. Discovery of Rhizopogon associated with Larix from northeastern Siberia: Insights into host shift of ectomycorrhizal fungi // *Mycoscience* 60 (2019) 274-280. SJR (2017) – 1.38 Q4;

6 Fedorov A.N., Vasilyev N.F., Torgovkin Y.I., Shestakova A.A., Varlamov S.P., Zheleznyak M.N., Shepelev V.V., Konstantinov P.Y., Kalinicheva S.V., Basharin N.I., Makarov V.S., Ugarov I.S., Efremov P.V., Argunov R.N., Egorova L.S., Samsonova V.V., Shepelev A.G., Vasiliev A.I., Ivanova R.N., Galanin A.A., Lytkin V.M., Kuzmin G.P., Kunitsky V.V. 2018. Permafrost-landscape map of the Republic of Sakha (Yakutia) at scale 1:1,500,000. 2018. *Geosciences*, 8, 465; DOI:10.3390/geosciences8120465;

7 Kim K, Yang J.W., Yoon, H., Byun, E., Fedorov, A., Ryu, Y., Ahn, J. 2019. Greenhouse gas formation in ice wedges at Cuyuie, central Yakutia. Permafrost and periglacial processes, 30, 1, 48-57. DOI: 10.1002/ppp.1994;

8 Kalinicheva S.V., Fedorov A.N., Zhelezniak, M.N. 2019. Mapping Mountain Permafrost Landscapes in Siberia Using Landsat Thermal Imagery. Geosciences, 9, 1, UNSP 4, DOI: 10.3390/geosciences9010004.

Публикация статьи в отечественном рецензируемом журнале, входящим в базу РИНЦ:

1 Жегусов Ю.И. Корякина З.И. Аналитическая справка изучения общественного мнения родителей о Законе Республики Саха (Якутия) «Об ответственном родителстве» по результатам фокус-группы//Научный электронный журнал Меридиан. –2018. –№7 (18). –С.12-14.

Научные статьи, доклады, тезисы докладов, изданные в сборниках материалов научных мероприятий:

1 Максимов Т.Х. Роль мерзлотных лесов Якутии в контексте глобального изменения климата//«Лесной форум», г. Якутск, 2-3 июня 2019 г.;

2 Максимов Т.Х. Мерзлотные лесные экосистемы Северо-востока России в изменяющемся климате//Всероссийская научная конференция с международным участием «Лесные экосистемы бореальной зоны: биоразнообразие, биоэкономика, экологические риски»/Красноярск, 26–31 августа. – 2019 г. –С. 260-262.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Важнейший результат МНОЦ BEST в 2018-19 гг.

На основании сравнительного анализа составляющих углеродного газообмена мерзлотных экосистем обоснованы адаптивные механизмы, лежащие в основе продукционного процесса растений криолитозоны.

Выбросы метана в водно-болотных угодьях были высокими. Озера и реки были источниками метана, в то время как лесные подстилки были в основном нейтральными с точки зрения выбросов CH_4 . Оценочные локальные выбросы метана ($37 \text{ мг м}^{-2} \text{ день}^{-1}$) были выше, чем те, о которых сообщалось в аналогичных исследованиях. Таким образом, рост и распространение лиственницы изменятся с изменением климата в будущем и не будут способствовать снижению местных выбросов CH_4 .