

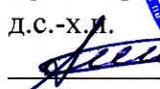
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КРАСНОЯРСКИЙ
НАУЧНЫЙ ЦЕНТР СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
ИНСТИТУТ ЛЕСА ИМ. В.Н. СУКАЧЕВА СО РАН – ОБОСОБЛЕННОЕ
ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ
ФИЦ КНЦ СО РАН
(ИЛ СО РАН)

УДК 630*907.1

Рег. № НИОКТР АААА-А17-117101940016-3

УТВЕРЖАЮ

Врио директора ФИЦ КНЦ СО РАН,
д.с.-х.и.


А.А. Шведт
« 22 » января 2020



ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

ДИНАМИКА ЛЕСОВ СИБИРИ В МЕНЯЮЩЕМСЯ КЛИМАТЕ. МОНИТОРИНГ
ЖИЗНЕННОГО СОСТОЯНИЯ, ПРОДУКТИВНОСТИ И АРЕАЛОВ ОСНОВНЫХ
ЛЕСООБРАЗУЮЩИХ ВИДОВ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ
(промежуточный за 2019 г.)

Направление фундаментальных исследований

VI.52.2. «Лесные экосистемы Сибири: адаптивный потенциал биосферных и ресурсных функций при различных сценариях климатических и антропогенных воздействий»

0356-2019-0009

Руководитель НИР
Главный научный сотрудник,
д-р биол. наук, академик РАН



Е.А. Ваганов

Красноярск 2020

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР
главный научный сотрудник
научно-исследовательской
лабораторией, д-р биол. наук



Е.А. Ваганов
(Введение, разделы 1, 2, 3,
Заклучение)

Исполнители:

Заведующий научно-
исследовательской
лабораторией, Главный научный
сотрудник, д-р биол. наук



В.И. Харук (раздел 1)

Заведующий научно-
исследовательской
лабораторией, канд. биол. наук
Ведущий научный сотрудник



А.С. Прокушкин (раздел 2)

Заведующий научно-
исследовательской
лабораторией, канд. биол. наук



Г.К. Зражевская (раздел 3)

Научный руководитель научно-
исследовательской лаборатории



Г.А. Гуггенбергер(раздел 3)

Старший научный сотрудник,
канд. биол. наук



Т.Б. Шибистова (раздел 3)

Заведующий научно-
исследовательской
лабораторией,
канд. физ.-мат. наук



А.В. Шашкин (раздел 4)

Старший научный сотрудник,
д-р. биол. наук



В.Е. Бенькова (раздел 4)

Старший научный сотрудник,
канд. техн. наук



М.А. Корец (раздел 5)

Нормоконтроль



Н.С. Кузьмик

РЕФЕРАТ

Отчет 50 с., 23 рис., 57 источн., 2 прил.

ЛЕСНЫЕ БИОГЕОЦЕНОЗЫ СИБИРИ, ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА, ПАРНИКОВЫЕ ГАЗЫ, ЛЕСНЫЕ ПОЖАРЫ, БИОГЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, МНОГОЛЕТНЯЯ МЕРЗЛОТА, ПОЧВЕННОЕ ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО, ГОДИЧНЫЕ КОЛЬЦА ДЕРЕВЬЕВ, КСИЛОТОМИЯ

Цель НИР-2019 — комплексное изучение лесов Сибири: изменений в их развитии, структуре, продуктивности, энерго- и массообмене с атмосферой, литосферой и гидросферой при современном изменении климата. Объектами исследований служили биогеоценозы, развивающиеся в основных биоклиматических провинциях Сибири.

При достижении поставленной цели использовался комплексный подход: полевые исследования, камеральные исследования, включающие эксперименты на измерительных установках, и теоретический анализ данных; прогнозное моделирование и разработка методик автоматизированной обработки информации.

Важнейшие результаты научно-исследовательской работы в 2019 году:

1) Сформирована карта биомассы заболони в северном полушарии, являющаяся основой для крупномасштабных оценок дыхания и транспирации древесных растений.

2) Установлено, что усыханию темнохвойные древостоев Сибири предшествовали изменения радиального прироста *Pinus sibirica* и *Abies sibirica*, а само явление обусловлено синергизмом индуцированного потеплением водного стресса и насекомых-вредителей. Прогностические модели дают высокую вероятность замещения этих видов толерантными к засухе видами в южных частях ареалов. Выявленные модификации в строении древесины у усыхающих деревьев в криогенных лиственничниках доказывают наличие острого водного дефицита.

3) Определено содержание обменных катионов (Ca, K, Mg, Na, Al, Fe, Mn) в почвах лесных экосистем на ключевых участках в южной, средней и северной тайге. На основе этих данных была рассчитана емкость катионного обмена и оценена степень насыщенности основаниями почв исследуемых регионов.

4) В полевом инкубационном эксперименте с захороненной почвой мерзлотной экосистемы Восточной Сибири определена суммарная величина эмиссии парниковых газов (CO₂, CH₄) за четыре вегетационных периода. Показано, что захороненная почва, вовлеченная в криотурбационные процессы, выделяет в 2,7 раза больше CO₂, чем почва, оттаивающая при береговой эрозии. В то же время, эмиссия метана при береговой эрозии в 1,6 раза превышает таковую в криотурбированных почвах.

5) Разработана методика комбинированного анализа данных дистанционного зондирования, цифровой модели рельефа и материалов наземных обследований, позволяющая оперативно модифицировать картографические модели в результате обновления исходной информации, что особенно актуально для обширных таежных регионов Сибири.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|-----------|
| Список исполнителей..... | 2 |
| РЕФЕРАТ..... | 3 |
| ВВЕДЕНИЕ..... | 5 |
| ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ | 8 |
| Раздел 1 Воздействие региональных изменений климата на жизненное состояние, продуктивность и горимость таёжных лесов Центральной Сибири и Алтае-Саянского региона..... | 8 |
| 1.1 Картографирование и динамика усыхания темнохвойных древостоев Средней Сибири..... | 8 |
| 1.2 Анализ нарушенности лесов Сибири пожарами..... | 11 |
| 1.3 Влияние пожаров на сток рек в криолитозоне | 12 |
| 1.4 Состояния послепожарного лесовосстановления для районов юга Сибири. Оценка интенсивности пожаров по данным дистанционного зондирования .. | 13 |
| 1.5 Моделирование процесса формирования границы леса в экотоне альпийской лесотундры | 13 |
| 1.6 Оценки потепления климата и изменения годового количества осадков в Сибири..... | 15 |
| Раздел 2 Актуализация и ретроспективный анализ запасов углерода в экосистемах Средней Сибири. Оценка эмиссионных и ассимиляционных потоков С в наземных и водных экосистемах | 17 |
| 2.1 Оценка выбросов парниковых газов из крупнейших антропогенных источников на территории Красноярского края..... | 18 |
| 2.2. Характеристики эмиссионных потоков ПГ и их изотопного состава из природных и антропогенных источников | 20 |
| 2.3 Оценка важнейших природных и антропогенных стоков и источников парниковых газов в атмосфере эстуарной зоны р. Енисей..... | 23 |
| 2.4 Оценка запасов заболони в лесах умеренной и бореальной зон северного полушария | 24 |
| Раздел 3 Динамика биогенных элементов в экосистемах Центральной Сибири | 27 |
| Раздел 4. Оценка воздействия климатических и локальных экологических факторов на жизненное состояние и продуктивность древостоев методами дендрозкологии | 32 |
| 4.1 Пространственно-временная асинхронность изменений погодных условий после мощных вулканических извержений по характеристикам годовых колец.... | 32 |
| 4.2 Связь темпов радиального роста и продолжительности жизни деревьев..... | 33 |
| 4.3 Модификации в ксилотомическом строении у деревьев в криолитогенном лиственничнике, поврежденном суховершинностью | 34 |
| Раздел 5. Разработка автоматизированных методов классификации и пространственного моделирования лесного покрова | 36 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... | 39 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ..... | 40 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПЕРЕЧЕНЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМАТИКЕ ПРОЕКТА В 2019 Г..... | 44 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ В СООТВЕТСТВИИ С ПЛАНом РАБОТ ПО ПРОГРАММЕ..... | 49 |

ВВЕДЕНИЕ

Лесные биогеоценозы Азиатской России представляют собой один из основных регуляторов климата планеты. В то же время, текущее глобальное потепление неизбежно влечет за собой часто непредсказуемые изменения в функционировании и степени их уязвимости, а также в направленности и скорости их биогеохимических процессов. В северо-таежных лесах и в особенности в лесах лесотундрового экотона последствия меняющегося климата наиболее заметны [1]. Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата в 2013-2014 гг. [2] констатирует, что с вероятностью более 95%, влияние человека (антропогенный фактор) было доминирующей причиной потепления, наблюдаемого с середины XX в. [3].

Изменение окружающей среды, происходящее вслед за изменением климата с начала XX в., привело к тому, что в течение последних десятилетий происходит изменение ареалов лесообразующих видов древесных растений с гораздо большей скоростью, чем максимальная скорость миграции, оцененная по палинологическим исследованиям [4, 5]. Прогностические модели подчеркивают высокую вероятность замещения влаголюбивых видов-лесообразователей толерантными к недостатку доступной влаги видами (см. результаты раздела 1 отчета).

В течение последних десятилетий происходит беспрецедентное в историческом масштабе усыхание и гибель хвойных древостоев [6] на всех континентах. Причину этого явления исследователи видят в том, что при современном изменении климата, проявляющейся чаще всего через аридизацию, провоцирующую увеличение частоты экстремальных природных явлений, в частности, горимость лесов, деревья часто испытывают острый водный дефицит в результате нарушения водного баланса [7, 8].

Лесные экосистемы высоких широт Евразии подстилаются вечной мерзлотой. Она является резервуаром огромного количества законсервированного в ней органического углерода (ОУ) [9, 10], уязвимого к повышению температуры [11]. Накопление, сохранение и распространение ОУ тесно связаны с широким спектром палеоэкологических факторов, а также ускорением климатических изменений [12], что наблюдается в последнее время. Ускоренная деградация многолетней мерзлоты вследствие оползней при современном потеплении климата препятствует накоплению в почве органического вещества. Центральный вопрос экологии — температурная чувствительность минерализации почвенного углерода — для почв Сибири остается не разработанным.

Цель научных исследований-2019 «Динамика лесов Сибири в меняющемся климате. мониторинг жизненного состояния, продуктивности и ареалов основных лесообразующих видов древесных растений» является важной и актуальной. Объектами

исследований служили биогеоценозы основных биоклиматических провинций Сибири.

Научно-технический уровень исследований. Проводимые исследования имеют высокий научный и технический уровень, базируясь на использовании оборудования мирового уровня, включая уникальную научную установку «Обсерватория ZOTTO», аппаратно-программные газоизмерительные (GHG-2) и микрометеорологические (BiometSystem 4) комплексы производства компании Li-Cor (США); лазерные спектрометры для измерений концентраций и изотопного состава CO₂, CH₄, H₂O – Picarro 2201-i, PicarroG2301-f, PicarroL2120-i; переносные инфракрасные газоанализаторы диоксида углерода и водяного пара LI-6400 (LI-COR, США), GFS-3000 (Walz, Германия). Уникальные комплексы гидрохимических и почвенных исследований. Аппаратно-программный комплекс ГИС «Леса Средней Сибири»; оборудование для сбора образцов древесины, измерения и анализа анатомических параметров годичных колец, программное обеспечение для обработки и анализа дендрохронологических и денситометрических данных; вычислительная и оргтехника, оборудование, снаряжение для проведения экспедиционных исследований. Для работы с данными дистанционного зондирования (ДДЗ) в ЦКП СО РАН имеется станция приема и обработки информации со спутников. Использовалось оборудование для сбора и обработки образцов древесины, проведения измерений и дендроклиматического анализа параметров годичных колец, состоящее из полуавтоматического измерительного комплекса LINTAB v3.0 с пакетами программного обеспечения TSAP v3, Arstan и Cofecha, и проведения ксилотомического анализа на установке компьютерного анализа изображений AxioImager MAT, Version 04/14/2005 (KarlZeisLightAGMicroscopy). Использовалось оборудование для непрерывного измерения сокодвигания в стволах деревьев по методу ТНВ (приборы EMS-51A+TC-120 и EMS MicroSet+SF-81) и дендрометры, функционирующие в непрерывном режиме (ленточные EMS DRL-26, Чехия, и точечные собственной модификации), отслеживающие суточную и сезонную вариабельность радиуса ствола. Использовалось стандартное программное обеспечение для обработки и анализа дендрохронологических и денситометрических данных, вычислительная и оргтехника, оборудование, снаряжение для проведения экспедиционных исследований.

Важнейший результат фундаментальных исследований. Проведен метанализ данных по запасам биомассы заболони и ее отношения к общей стволковой древесине для 25 основных древесных пород бореальной и умеренной зон. В результате исследования сформирована карта биомассы заболони в северном полушарии (рис. 1), являющаяся основой для крупномасштабных оценок дыхания и транспирации древесных растений. Определена общая биомасса заболони в бореальной зоне – $12,87 \pm 6,56$ Пг углерода

(средняя плотность углерода: $1,13 \pm 0,58 \text{ кгС м}^{-2}$) и в умеренных лесах – $15,80 \pm 9,10 \text{ ПгС}$ ($2,03 \pm 1,17 \text{ кгС м}^{-2}$).

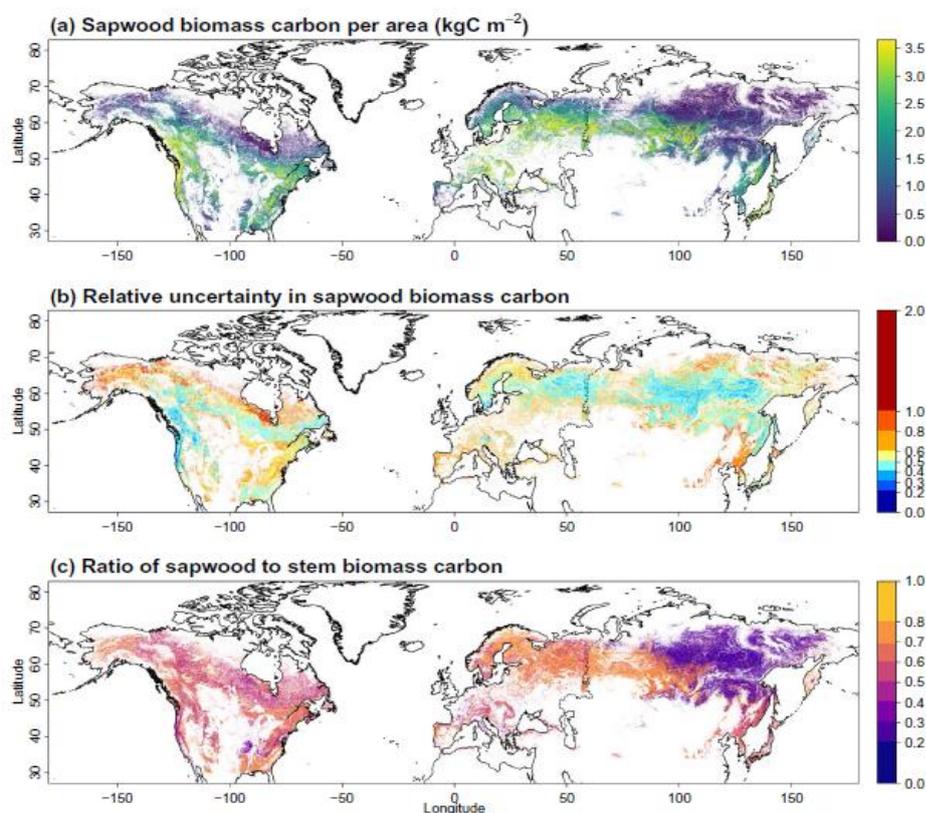


Рисунок 1 - (а) Карта распределения биомассы заболони в северном полушарии, (б) относительная неопределенность в оценке биомассы заболони, (с) соотношение заболони к общей стволовой биомассе. Маскирование нелесных участков выполнено с использованием GLC2000 [13], <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/geb.12883>. Авторы: ThurnerM., BeerC., CrowtherT., FalsterD., ManzoniS., ProkushkinA., SchulzeE.-D. ThurnerM., BeerC., CrowtherT., FalsterD., ManzoniS., **ProkushkinA.**, SchulzeE.-D. SapwoodbiomasscarboninnorthernborealandtemperateForests // GlobalEcologyandBiogeography. 2019; 28. – 640–660.

Показано, что пространственные закономерности соотношения биомассы заболони к стволу определяются спецификой породного состава древостоев. Значительные пространственные различия в пропорциях биомассы заболони указывают на необходимость учитывать функционально более важную заболонь, а не всю стволовую биомассу в глобальных исследованиях круговорота углерода и воды. Изменения в распределении пород деревьев, вызванные лесопользованием или изменением климата, могут оказать существенное влияние на биомассу заболони древостоев, даже если стволовая биомасса останется неизменной.

Актуальность и новизна. По своему уровню, проводимые исследования являются пионерными для Сибири. Комплексный научный подход и уникальное оборудование позволяют решать актуальные задачи, возникающие в лесных биоценозах в меняющейся климатической и экологической ситуации.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Раздел 1 Воздействие региональных изменений климата на жизненное состояние, продуктивность и горимость таёжных лесов Центральной Сибири и Алтае-Саянского региона

Изменение климата влечет изменение ареалов основных лесообразующих пород таёжных лесов Сибири. Это происходит как вследствие усыхания древостоев, сформированных темнохвойными в части их ареала, так и продвижения древостоев в экотон горной лесотундры, где температура по-прежнему является лимитирующим фактором роста. Изучение воздействия изменений климата на леса бореальной зоны представляет одно из важнейших направлений исследований наземных экосистем [14]. Ухудшение состояния хвойных отмечается как в целом в лесах бореальной зоны, так и в значительной части лесного фонда России. В Сибири в подзоне южной тайги наблюдается усыхание темнохвойных древостоев, сформированных кедром, пихтой и елью [15]. В высокогорьях наблюдается возрастание сомкнутости темнохвойных и лиственничников, возрастание радиального прироста кедра, пихты и лиственницы, а также продвижение древесной растительности по градиенту высоты [16, 17]. Изменение климата может повлечь продвижение южной и северной границ темнохвойных на север. Согласно прогнозам, изменение климата повлечет элиминацию ряда видов вследствие их неспособности восстанавливаться после воздействия повторяющихся засух [18].

В бореальной зоне проблема лесных пожаров является приоритетной. В условиях меняющегося климата, растущего хозяйственного освоения территорий, повышения уровня техногенного воздействия прослеживается тенденция повышения горимости лесов [19]. Отмечено, что первая декада XXI века характеризовалась увеличением частоты возникновения пожаров и площадей, ежегодно подвергающихся пирогенному воздействию, как в масштабах Северного полушария [20], так и в Сибири [21-23]. В настоящее время в лесах Сибири наблюдается возрастание частоты и площади пожаров [24-26] и прогнозируется дальнейшее возрастание горимости в лесной и лесостепной зонах.

1.1 Картографирование и динамика усыхания темнохвойных древостоев Средней Сибири

При проведении научно-исследовательских работ (НИР) в 2019 г. было выполнено обзорное картографирование усыхающих темнохвойных древостоев Средней Сибири (рис. 2). Было констатировано, что усыхание наблюдается преимущественно в южной части ареалов кедра и пихты в низкогорьях на элементах рельефа с максимальным риском водного стресса.

Усыханию темнохвойные древостоев Сибири предшествовали изменения прироста деревьев *Pinus sibirica* DuRoi и *Abies sibirica* Ledeb. В начальной фазе (с 1970-х годов) потепление стимулировало возрастание индекса прироста (ИП) деревьев, сменившееся депрессией ИП при дальнейшем повышении температуры воздуха, что обусловлено

возникновением водного стресса. После «точки перегиба» ИП (середина 1980-х, рис. 3) условия влагообеспечения (индекс засушливости SPEI, влажность корнеобитаемого слоя) становятся лимитирующим рост фактором, тогда как температура воздуха в начале периода вегетации ингибирует ИП обеих когорт указанных видов деревьев (рис. 4).

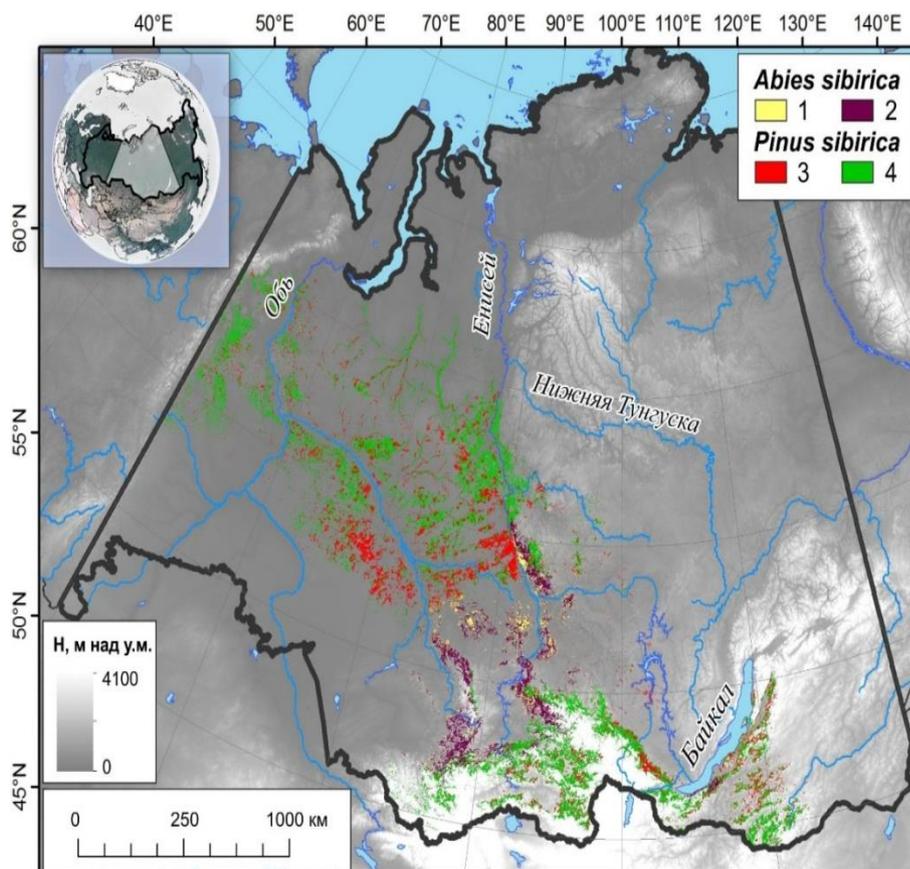


Рисунок 2 – Карта усыхающих темнохвойных лесов Средней Сибири. 1, 3 – усохшие пихтовые и кедровые леса; 2, 4 – здоровые леса

Возрастание аридности климата в сочетании с периодическими засухами и атаками дендрофильных насекомых физиологически ослабленных деревьев повлекло разделение популяции на когорты «усыхающих» и «живых» деревьев. Точки разделения (tipping point) на когорты соответствуют датам сильных засух (1998-1999 и 2002-2003 гг, рисунок 4). В тоже время подрост указанных видов благонадежен и при благоприятном климатическом сценарии способен сформировать леса. В условиях достаточного увлажнения (напр., высокогорья, экотон альпийской лесотундры) наблюдается возрастающий тренд ИП кедра и пихты. Полученные данные подтверждают прогностические модели, указывающие на высокую вероятность замещения влаголюбивых видов *Abies sibirica* и *Pinus sibirica* в южных частях ареалов более толерантными видами.

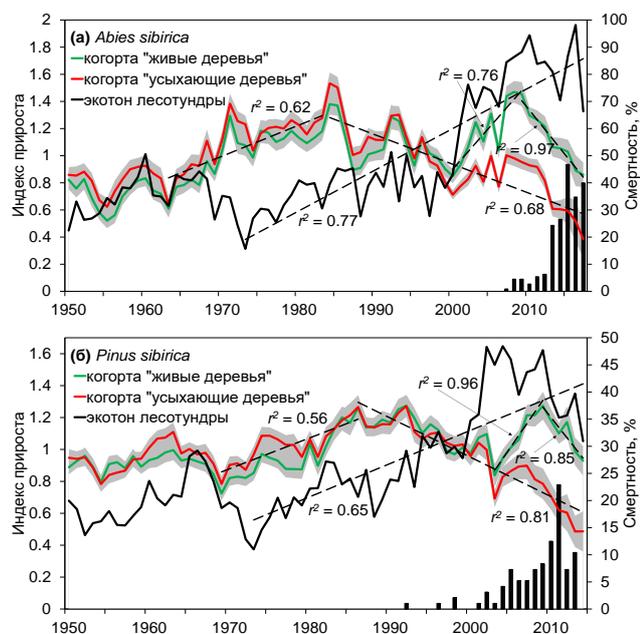


Рисунок 3 - Динамика радиального индекса прироста и смертности деревьев *Abies sibirica* и *Pinus sibirica*, относящихся к когортам «выживших» и «усыхающих», а также произрастающих в экотоне горной лесотундры. Смертность деревьев (% от выборки) указана гистограммой. Доверительный интервал ($p < 0.05$) обозначен серым фоном

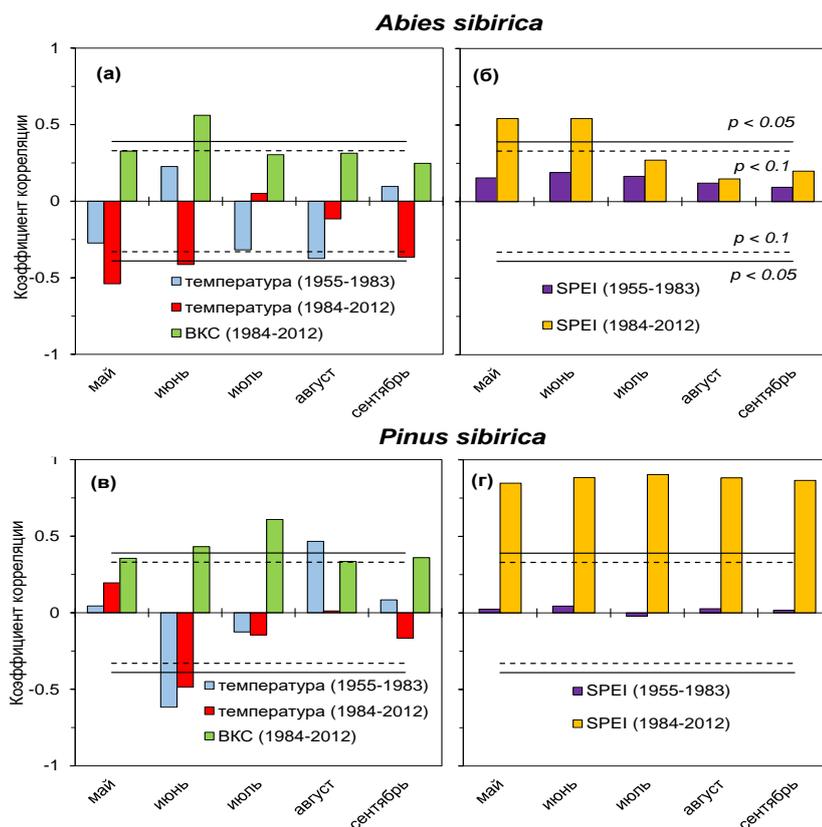


Рисунок 4 - Зависимость индексов радиального прироста деревьев *Abies sibirica* (а, б) и *Pinus sibirica* (в, г) (когорт «усыхающие деревья») от температуры воздуха, ВКС и индекса засушливости SPEI. Данные представлены для периода снижения ИП (1984-2012 гг.) в сравнении с соответствующим предшествующим периодом. Уровни достоверности ($p < 0,05$ и $p < 0,1$) указаны сплошной пунктирной линиями.

1.2 Анализ нарушенности лесов Сибири пожарами

Предложен метод и выполнено районирование территории Сибири по степени нарушенности растительности пожарами. Пространственная оценка нарушенности лесов выполнялась в масштабе речных бассейнов. Векторные слои бассейнов рек Сибири доступны в каталогах SHuttleElevationDerivativesatmultipleScales (HydroSHEDS, <http://www.hydrosheds.org>). Обработанные средствами ГИС покрытия бассейнов рек (уровни вложенности 4–9 в классификации HydroSHEDS) были применены при вычислениях горимости и нарушенности растительности в границах природно-обусловленных таксонов с близкими физико-географическими, метеорологическими характеристиками и условиями лесопроизрастания. Использовалась база данных пожаров, сформированная по результатам спутникового мониторинга в 1996–2018 гг. Средствами геопространственного анализа выполнялись оценки многолетней вариации пожарного воздействия на растительные покровы. В процедуре пересечения векторных слоев учитывалась привязка пожаров к преобладающим типам древостоев Сибири, грациям мерзлотных зон и бассейнами рек 9 уровня (классификации HydroSHEDS). Стандартными методами вычисляли показатель горимости (γ , %) как отношение суммарной площади пожаров за сезон к площади рассматриваемого таксона. Фактический размер ячейки интерполяции ~25 тыс. га. Результат геопространственной интерполяции интегрального многолетнего эффекта от пожаров представлен в формате векторной карты нарушенности лесов масштаба 1:750000 (рис. 5).

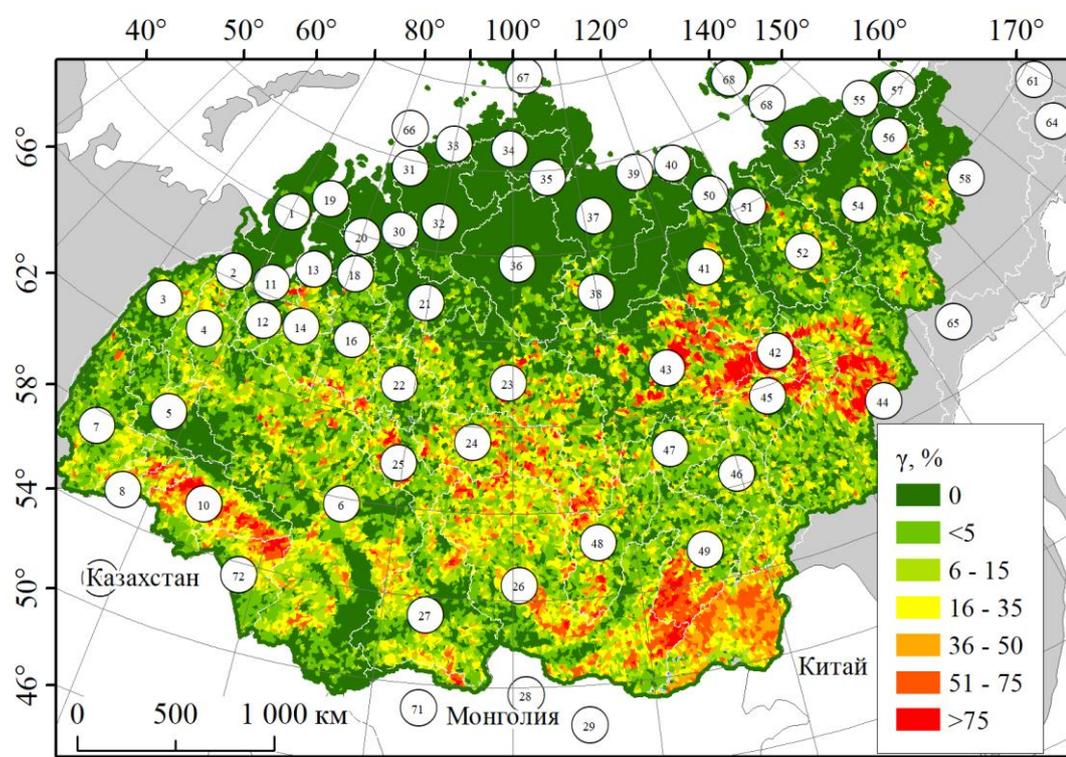


Рисунок 5 - Нарушенность лесов по отношению к площади таксона (γ , %), как интегральный эффект воздействия пожаров за период 1996–2018 гг. Цифры – бассейны 4 уровня (по HydroSHEDS)

Выявлен многолетний тренд горимости лесов с привязкой к основным лесообразующим породам древостоев, который описывается логарифмической функцией (достоверность аппроксимации $R^2 > 0,92$) (рис. 6). Прогностические оценки в условиях сохранения современных пожарных режимов в Сибири представлены до 2030 г. (рис. 6).

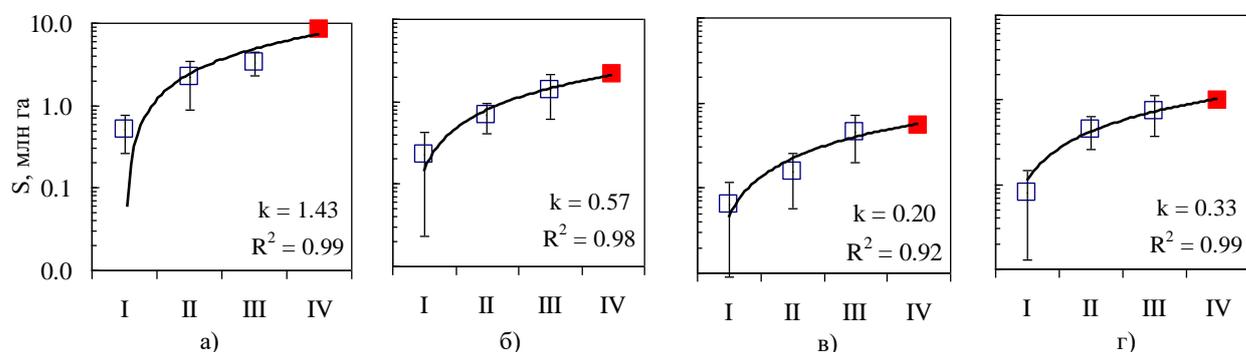
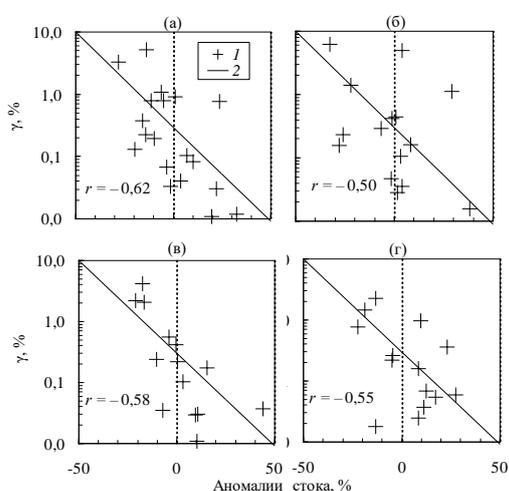


Рисунок 6 - Оценки пожарного воздействия в лиственничниках (а), сосняках (б), темнохвойных (в), лиственных и смешанных лесах (г). 1996–2018 гг. (I – III), прогноз до 2030 г. (IV)

1.3 Влияние пожаров на сток рек в криолитозоне

В первом приближении зафиксирован долговременный отклик на масштабные пирогенные изменения в температурном и водном режимах сезонно-талого слоя почв, проявляющийся в аномалиях внутрисезонной динамики объема стока рек Средней Сибири в послепожарный летне-осенний период. Данная гипотеза основана на том, что до 10–25% их питания определяет грунтовый сток, и его динамика определяется в том числе состоянием растительного покрова и/или послепожарными сукцессионными процессами. Выполнен анализ доступных хронологий (1939–2017 гг.) экстремальных пожарных событий в границах бассейнов рек Средней и Восточной Сибири и месячных данных (TheGlobalRunoffDataCentre, 56068 Koblenz, Germany) о стоках рек (Нижняя Тунгуска, Подкаменная Тунгуска, Алдан, Вилюй). Период повторения минимумов речных стока составлял от 18 до 25 лет. Зафиксирована корреляционная связь стока с экстремальными



значениями показателя горимости лесов (γ , %) в границах бассейнов рек на уровне $r \sim -0,50 \dots -0,62$ ($p < 0,05$) (рис. 7).

Рисунок 7 - Графики корреляционного поля горимости лесов в границах бассейнов рек (γ , %) и аномалий стока за первую половину вегетационного периода (март–июль): Алдан (а), Вилюй (б), Подкаменная Тунгуска (в), Нижняя Тунгуска (г). 1 – по фактическим данным, 2 – модель.

1.4 Состояния послепожарного лесовосстановления для районов юга Сибири. Оценка интенсивности пожаров по данным дистанционного зондирования

Для районов юга Сибири (Забайкальский край) выполнен анализ временных рядов данных Landsat совместно с результатами полевых исследований состояния послепожарного лесовосстановления. Получены оценки послепожарной динамики растительности как функции следующих факторов: уровень пирогенного воздействия, состояние леса перед пожаром, топография, положительные аномалии температуры поверхности. Регрессионная модель показала, что частота возникновения пожара, уровень пирогенного воздействия и аномалии температуры поверхности являются основными факторами, объясняющими около 58% дисперсии в послепожарной динамике вегетационного индекса. Высокая частота возникновения пожаров и положительные аномалии температуры поверхности препятствуют процессу лесовосстановления после пожара, в то время как пожары высокой интенсивности сопровождаются более высокой скоростью послепожарного восстановления.

Разработан метод параметризации интенсивности пожаров на основе дистанционных данных о мощности теплоизлучения от зон активного горения (FRP). Впервые применительно к условиям горения в лесах Сибири выполнена классификация пожаров в терминах интенсивности горения. Пороговые значения, разделяющие категории, определяются из дисперсии значений FRP в течение времени развития пожара. Квантили интенсивности задаются с учетом стандартного отклонения (σ) от среднего: I-й квантиль соответствует значениям $FRP < FRP_{cp} - \sigma$, критерий II-ого квантиля $FRP_{cp} - \sigma < FRP < FRP_{cp} + \sigma$, III квантиль – $FRP > FRP_{cp} + \sigma$. Вероятность дистанционного детектирования пожаров экстремальной интенсивности, включая стадию верхового горения, составляет не ниже 65–70%. Инструментально установлено соотношение площадей низкоинтенсивного горения (41,2–58,9% от общей площади пожаров в сезон), пожаров средней интенсивности (35,0–46,5%), а также доля экстремальных пожаров (6,1–13,4%) в привязке к преобладающим древостоям в Сибири. Подход позволяет осуществлять мониторинг пожаров переменной интенсивности и выполнять количественную оценку объемов сгорающих лесных горючих материалов, а также оценку прямых эмиссий углерода в режиме, приближенном к реальному времени обнаружения активной зоны пожара.

1.5 Моделирование процесса формирования границы леса в экотоне альпийской лесотундры

Выполнен модельный анализ роли неоднородности местообитаний в формировании пятнистой ветровой границы древесной растительности в экотоне альпийской лесотундры. Тип модели - вероятностный клеточный автомат. Моделируется рост, возобновление, отмирание, взаимодействие древесных растений в условиях интенсивного ветра постоянного направления в предположении что деревья после достижения определенной высоты улучшают условия роста для соседней древесной растительности. Параметры модели оценены для сосны сибирской для одного и того же

участка в горах Алтая в экотоне лес-тундра: параметры взаимодействия деревьев по результатам дистанционных наблюдений за 1968, 2003, 2010 годы, параметры функций роста в высоту и отмирания по данным наземных измерений. Неоднородные условия (наличие “абиотических” укрытий от ветра) имитировались тем что для некоторой части ячеек выживаемость древесных растений, равная единице, устанавливалась на первом шаге моделирования и сохранялась в них же до конца периода моделирования. Однородные условия (отсутствие укрытий) - для такой же доли ячеек выживаемость равная единице устанавливается заново (в разных местах) на каждом шаге моделирования. Итоговые характеристики для каждой генераций размещения на конец периода моделирования: F_p - доля ячеек, содержащих деревья, R_x и R_y - радиусы корреляции в направлении ветра и в направлении, перпендикулярном направлению ветра, характеризующие средний размер групп деревьев (рис. 8).

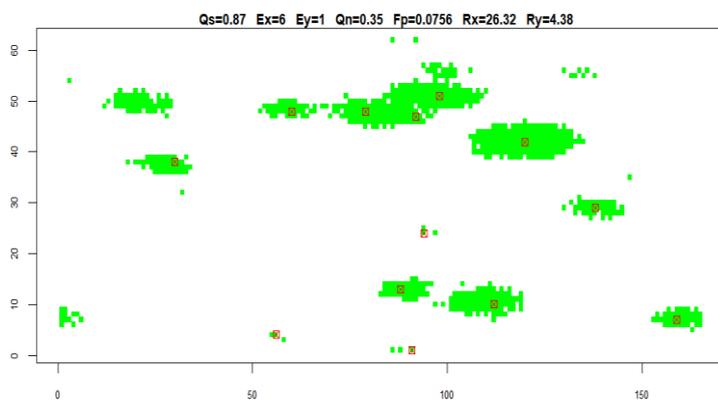


Рисунок 8 - Размещение лесных ячеек для одной из реализаций в неоднородных условиях. Красными квадратами отмечены "укрытия".

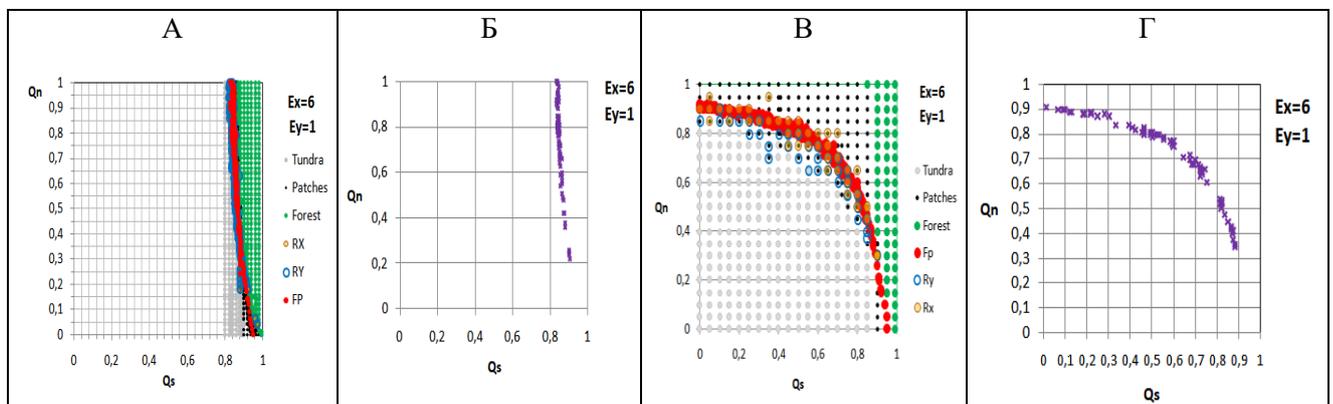


Рисунок 9 - Области значений параметров для расстояний взаимодействия $X=6$ м, $Y=1$ м, в которых итоговые характеристики F_p , R_x , R_y , соответствуют натурным данным по отдельности (А, В) и одновременно (Б, Г) для однородных (А, Б) и неоднородных (В, Г) условий. Q_n - интенсивность взаимодействия, Q_s - выживаемость без укрытий

Задача вычислительного эксперимента — определение областей значений параметров взаимодействия и выживаемости деревьев, в которых итоговые характеристики результатов экспериментов соответствуют данным наблюдений для неоднородных и однородных условий. Показано, что в исследованном диапазоне значений параметров существуют области, в которых групповое распределение может формироваться как в неоднородных местообитаниях, так и в однородных за счет

взаимодействия растений. При наличии укрытий формирование групп может происходить в областях параметров с низкой вероятностью выживания Qs отдельно стоящих деревьев (рис. 9 В, Г), чего не наблюдается в отсутствии укрытий (рис. 9 А, Б).

1.6 Оценки потепления климата и изменения годового количества осадков в Сибири

На основе средних климатических показателей (температуры января и июля и годового количества осадков), рассчитанных по ансамблю 20 климатических моделей из CMIP5 и двух сценариев изменения климата RCP 2,6 (умеренное потепление) и RCP 8,5 (сильное потепление) получены оценки потепления климата зимой и летом и изменения годового количества осадков в Сибири: 3,4°C (RCP 2,6)– 9,1°C (RCP 8,5) зимой; 1,9°C (RCP 2,6) – 5,7°C (RCP 8,5) летом; 60 мм (RCP 2,6) – 140 мм (RCP 8,5) за год. Биоклиматическая модель фитомассы лесов была получена сопряжением данных по фитомассе климатическими показателями, проинтерполированными по географическим координатам и абсолютной высоте для территории Сибири. К концу века климат Сибири будет более мягким и умеренным, более сухим, зона вечной мерзлоты сузится. В соответствии с этими проекциями изменения климата прогнозируется следующее:

1. - в соответствии со сценарием RCP 2,6 зона лесов уменьшится и сдвинется к северо-востоку в зону тундры, увеличится фитомасса лесов;
- 2.- в соответствии со сценарием RCP 8,5 лесная зона также сдвинется на северо-восток и существенно уменьшится, также уменьшится фитомасса лесов (рис. 10). В более теплом, но сухом климате увеличится зона лесостепи и степей, появятся условия для произрастания широколиственных лесов, до 50% всей лесной зоны по жаркому RCP 8,5 сценарию. Устойчивые к водному стрессу светлохвойные породы (лиственницы и сосна) будут иметь преимущество перед темнохвойными породами (кедр, пихта, ель) в засушливом климате. Лиственница останется основным лесообразователем в зоне вечной мерзлоты, таяние которой по прогнозам будет не таким быстрым, как потепление климата.

Таким образом, усыхание древостоев, сформированных *Pinus sibirica* и *Abies sibirica* обусловлено синергизмом водного стресса и насекомых-вредителей. Темнохвойные леса усыхают преимущественно в низкогорьях южной части ареалов кедра и пихты. Высока вероятность замещения их толерантными к засухе видами.

Построены прогнозные карты потенциального изменения растительности, структуры и продуктивности лесов Сибири, из которых следует, что лиственница останется основной лесообразующей породой в зоне вечной мерзлоты.

Разработан метод параметризации интенсивности пожаров. Реализована система обработки спутниковых данных, позволяющая количественно оценивать объем сгорающих лесных горючих материалов и прямые эмиссии углерода в режиме, приближенном к реальному времени. Установлен вклад в эмиссии пожаров низкой, средней и высокой интенсивности (33–37%, 47–49% и 14–17%, соответственно).

Полученные в ходе выполнения Проекта результаты исследований состояния таёжных лесов Средней Сибири в условиях меняющегося климата находятся на уровне мировых исследований, выполняемых в лесах бореальной зоны.

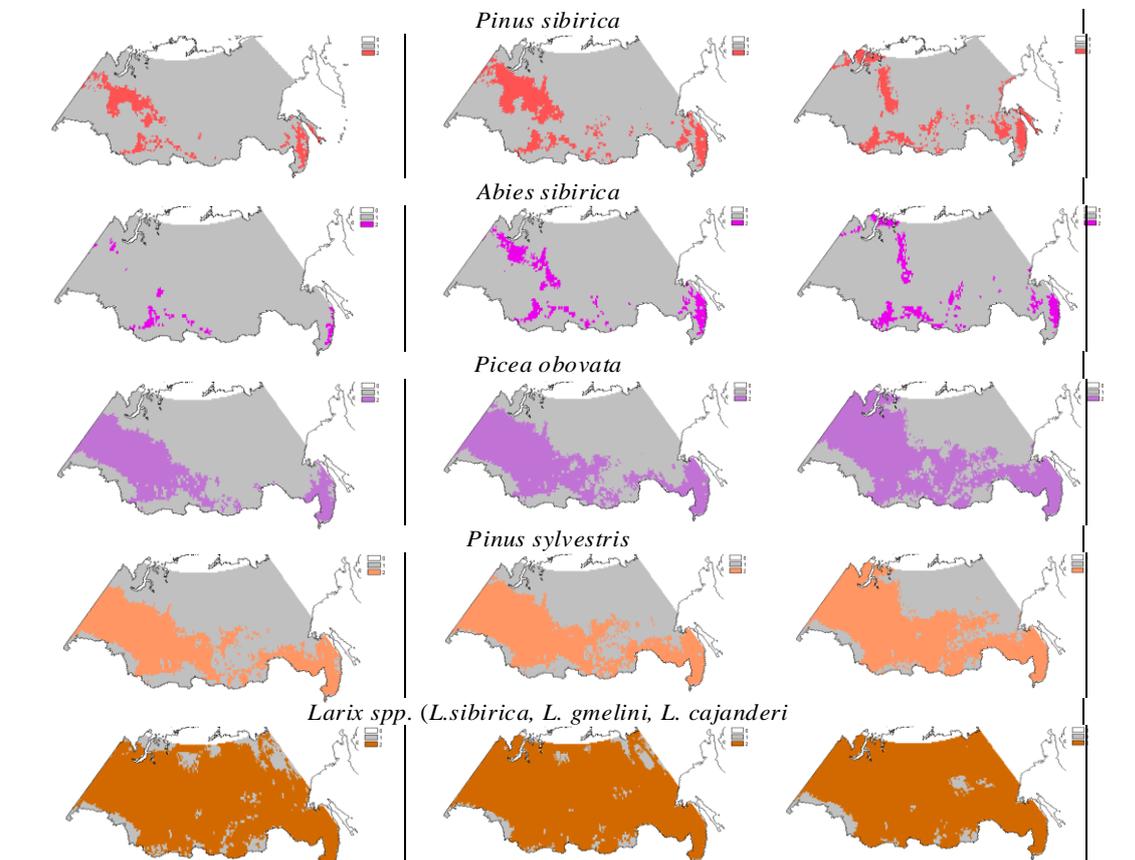
1960-1990

2080

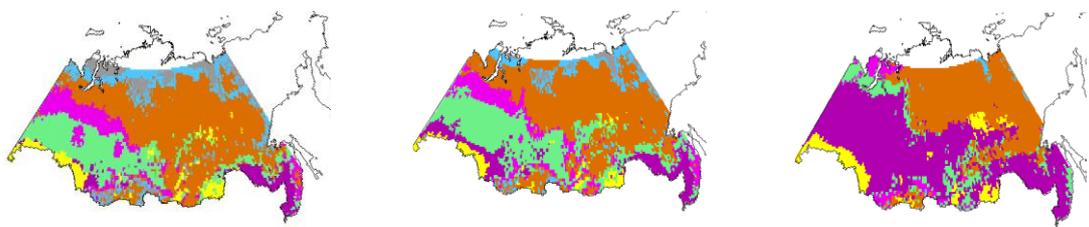
Rcp 2.6

Rcp 8.5

Распределение лесообразующих пород



Распределение биомов



Распределение фитомассы

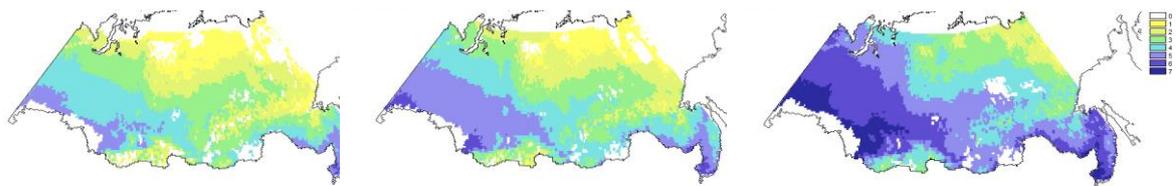


Рисунок 10 - Распределение основных лесообразующих пород, биомов и наземной фитомассы в Азиатской России в современном климате и при потеплении к концу 21 в.

Раздел 2 Актуализация и ретроспективный анализ запасов углерода в экосистемах Средней Сибири. Оценка эмиссионных и ассимиляционных потоков С в наземных и водных экосистемах

Концентрации парниковых газов в 2018 г. обновили свои рекорды достигнув, соответственно, для CO₂ 407,8±0,1 ppm, CH₄ 1869±2 ppb и N₂O 331,1±0,1 ppb, что составило 147%, 259% и 123% от их пред-индустриальных уровней (до 1750 г.) [27]. Российская Федерация является страной, входящей в приложение I РКИК ООН и в приложение «В» Киотского протокола. Поэтому в соответствии со своими обязательствами по статьям 4 и 12, Российская Федерация разрабатывает, периодически (в настоящее время – ежегодно) обновляет, публикует и предоставляет Конференции Сторон РКИК ООН через секретариат РКИК ООН национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями всех парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом [28, 3]. Основная цель инвентаризации парниковых газов – это поиск путей сокращения антропогенных выбросов парниковых газов.

Температурная чувствительность (Q10) минерализации почвенного углерода - центральный вопрос экологии. Значения Q10 для почв Сибири практически не изучены, в особенности в условиях повышенного поступления азота. Поэтому целью работы было определение влияния внесения азота на Q10 минерализации углерода в серой лесной почве под сосняком и лесной поляной. Уровень исследования соответствует мировому, поскольку использовалась новая методика экспресс-оценки Q10.

Арктика - один из четырех регионов мира, отнесенных межправительственной группой экспертов по изменению климата к наиболее климатически уязвимым. Согласно четвертому оценочному докладу МГЭИК [1], Арктический регион находится на начальном этапе перемен, порождаемых значительным поступлением в атмосферу ПГ антропогенного происхождения. В настоящее время отмечаются изменения в площадях распространения вечной мерзлоты и сдвиги в потоках углерода в атмосферу и гидрографическую сеть - Арктический (полярный) бассейн.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ. В настоящем отчете о НИР применяют следующие сокращения соответствующих терминов:

РОУ – растворенный органический углерод

РНУ – растворенный неорганический углерод

NPP – чистая первичная продуктивность

Hr – гетеротрофное дыхание

NEP – чистая экосистемная продуктивность

NEE – чистый экосистемный обмен

ПГ – парниковые газы

СЛО – Северный Ледовитый океан

ВМ – воздушные массы

МГЭИК – межправительственная группа экспертов по изменению климата

ppm – количество частиц газа на миллион частиц воздуха

ИП – индекс прироста

ВКС - влажность корнеобитаемого слоя.

2.1 Оценка выбросов парниковых газов из крупнейших антропогенных источников на территории Красноярского края.

Выбросы CO₂ от сжигания ископаемого топлива — не только главная составляющая всех антропогенных выбросов парниковых газов, но и наиболее точно известная их часть. При этом выбросы CO₂ при сжигании угля, газа, нефтепродуктов и торфа зависят, прежде всего, от количества использованного топлива [28]. Поэтому, с целью инвентаризации выбросов парниковых газов на территории Красноярского края от сжигания топлива (преимущественно бурого угля и мазута) с целью производства энергии (электричества и тепла) проведена оценка выбросов газов с прямым парниковым эффектом – двуокси углерода (CO₂), и метана (CH₄) за период 2003-2018 гг. на основе данных о количестве потребленного топлива крупнейшими предприятиями энергетического комплекса Красноярского края.

Объекты и методика. Во всех странах сжигание топлива — предмет строгой статистической отчетности [28]. Исходными данными для расчета выбросов служат данные о деятельности предприятия, которые представляют собой сведения о количестве и виде сожженного за год ископаемого топлива, то есть фактическое потребление топлива за год, по которым предприятия ведут учет. Поэтому на начальной стадии исследования был выполнен поиск годовых отчетов крупнейших предприятий энергетического комплекса Красноярского края, использующих уголь и мазут для получения энергии и тепла, а именно ОАО "Енисейская ТГК (ТГК-13)" (ОАО «Красноярская ТЭЦ-1», ОАО «Красноярская ТЭЦ-2», Красноярская ТЭЦ-3, Красноярская ТЭЦ-4, ОАО «Канская ТЭЦ», Минусинская ТЭЦ, Назаровская ГРЭС), ПАО «ОГК-2» (Красноярская ГРЭС-2, ранее входила в ОГК-6), ПАО «Юнипро» (Березовская ГРЭС, ранее входила в группу ОАО «Э.ОН Россия», ОАО «ОГК-4») на сайтах компаний и в открытом доступе в сети «Интернет». Далее из годовых отчетов была извлечена следующая информация о производственной деятельности предприятий: Установленная электрическая мощность (МВт), Установленная тепловая мощность (Гкал/ч), Годовая выработка электричества (млн. кВт*ч), Годовая выработка тепловой энергии (тыс. Гкал), Удельный расход условного топлива на э/э (УРУТ э.э., г/кВт*ч), Удельный расход условного топлива на т/э (УРУТ т.э., кг/Гкал), Потребление угля в натуральных единицах (тыс т.), Потребление мазута в натуральных единицах (тыс т.), Потребление угля в единицах удельного топлива (тыст.у.т.), Потребление мазута в единицах удельного топлива (тыст.у.т.), Коэффициенты перевода потребления угля и мазута в натуральных единицах в условные. При отсутствии данных о потреблении топлива, его оценка проводилась через параметры - Годовая выработка электричества и Удельный расход условного топлива на э/э. Выбросы парниковых газов (ПГ: CO₂ и CH₄) рассчитаны по формулам (1) и (2) в соответствии с Национальным докладом... (2012).

Расчет выбросов CO₂ для каждого вида топлива (уголь или мазут):

$$E = M * K1 * TH3 * K2 * 44/12 \quad (1)$$

Расчет выбросов CH₄ для каждого вида топлива (уголь или мазут):

$$E = M * K1 * TH3 * K2 * 16/12 \quad (2),$$

Где E - годовой выброс CO₂ в весовых единицах (тонн/год); M - фактическое потребление

топлива за год (тонн/год); K1 - коэффициент окисления углерода в топливе (показывает долю сгоревшего углерода), уголь = 0,98, мазут = 0,99; ТНЗ - теплотворное нетто-значение (Дж/тонн), бурый уголь = 15,73, мазут = 41,15; K2 - коэффициент выбросов углерода (тонн/Дж), бурый уголь = 25,15, мазут = 20,84; 44/12 - коэффициент пересчета углерода в углекислый газ (молекулярные веса соответственно: углерод - 12 г/моль, O₂ = 2 * 16 = 32 г/моль, CO₂ = 44 г/моль). 16/12 - коэффициент пересчета углерода в метан (молекулярные веса соответственно: углерод - 12 г/моль, H₄ = 4 * 1 = 4 г/моль, CH₄ = 16 г/моль).

Статистический анализ выполнен в ПО Microsoft® Excel® 2013 и R (version 3.6.0., R Development Core Team, Vienna, Austria).

Основные результаты. На основе данных годовых отчетов крупнейших энергетических компаний Красноярского края проведена оценка выбросов парниковых газов (ПГ, углекислый газ и метан) по объемам сжигания топлива (уголь и мазут) за период с 2003 по 2018 г. (рис. 11). Объемы выбросов парниковых газов (CO₂ и CH₄) на отдельных предприятиях за рассматриваемый период практически не изменились, в некоторых случаях даже возросли, как например, на Красноярской ГРЭС-2 (ПАО «ОГК-2») с 3,3-4,2 до 4,8-5,2 млн. тонн CO₂-эквивалента в год. Выбросы парниковых газов в результате сжигания топлива на ОАО «Красноярская ТЭЦ-1» и ОАО «Красноярская ТЭЦ-2» сопоставимы по величине (2,7-3,6 млн. тонн CO₂-эквивалента в год), выбросы ПГ от Красноярская ТЭЦ-3 существенно ниже (0,7 млн. тонн CO₂-эквивалента в год). Выбросы от Красноярской ТЭЦ-4 минимальны (0,04 млн. тонн CO₂-эквивалента в год). ОАО «Канская ТЭЦ» и Минусинская ТЭЦ ежегодно выбрасывают от 0,3 до 0,5 млн. тонн CO₂-эквивалента парниковых газов в год.

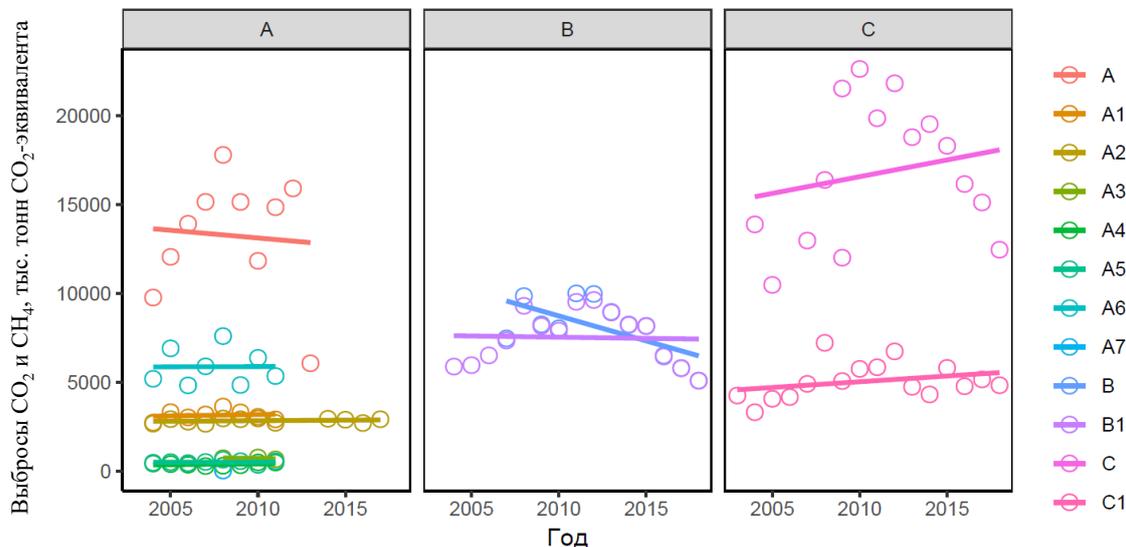


Рисунок 11 – Динамика выбросов парниковых газов (углекислый газ и метан) крупнейшими энергетическими компаниями Красноярского края за период с 2003 по 2018

Расшифровка легенды: А – всё ОАО "Енисейская ТГК (ТГК-13)";

А1 - ОАО «Красноярская ТЭЦ-1»; А2 - ОАО «Красноярская ТЭЦ-2»;

А3 - Красноярская ТЭЦ-3; А4 - ОАО «Канская ТЭЦ»; А5 - Минусинская ТЭЦ;

А6 - Назаровская ГРЭС; А7 - Красноярская ТЭЦ-4;

В – всё ПАО «Юнипро» (ранее ОАО «Э.ОН Россия», ОАО «ОГК-4»); В1 -

Березовская ГРЭС. С - всё ПАО «ОГК-2» (ранее ОГК-6); С1 - Красноярская ГРЭС-2

Максимальные выбросы из всех перечисленных теплоэнергетических предприятий регистрируются на Березовской ГРЭС (Шарыпово), они оцениваются в 5,0-9,6 млн. тонн CO₂-эквивалента парниковых газов в год. Максимальный объем выбросов из 9 крупнейших источников может достигать 32,4 млн. т CO₂-эквивалента в год (2008 г.), что в расчете всю территорию Красноярского края составляет 13,8 г CO₂/м². При этом чистое поглощение CO₂ лесными территориями края, согласно измерениями методом микровихревых пульсаций, варьирует от 496±99 г CO₂/м²/год в северотаежных лиственничниках до 581,4±45,6 г CO₂/м²/год в среднетаежных темнохвойных лесах (см. отчет 2018 г.).

2.2. Характеристики эмиссионных потоков ПГ и их изотопного состава из природных и антропогенных источников

Объекты и методика. Для характеристики изотопных сигнатур выбросов ПГ из природных и антропогенных источников был проведен анализ доступных баз данных [напр., 31], научных публикаций (более 100), собственных исследований состава стабильных изотопов (δ¹³C) в углях и парниковых газов, выделяющихся с поверхности лесных почв, болот и водотоков Средней Сибири, а также донных отложений р. Енисей и его притоков.

Изотопный состав углей нескольких регионов Сибири (n = 11), почв и растительного покрова получен на основе измерений на элементном анализаторе VarioIsotopecube с IRMSIsoprime 100. Изотопный состав парниковых газов, выделяемых с поверхности почвы и водотоков, был исследован как в ходе полевых работ (камерный метод), так и в лабораторных инкубационных экспериментах. Измерения концентраций и изотопного состава выделяемых ПГ осуществлялись на анализаторе Picarro 2201-i с SSIM.

С целью количественной оценки эмиссионных потоков ПГ в течение вегетационного периода 2019 г. на базе международной обсерватории ZOTTO проведены комплексные исследования их сезонной динамики с поверхности почвы в ключевых типах земного покрова: в сосняках лишайниковых, их производных на разных стадиях лесовосстановления после воздействия низовых пожаров, олиготрофном болоте (среднем ряме) и водотоках, дренирующих водосборы разных порядков. Проведен полевой эксперимент для выявления отклика почвенного дыхания на внесение азота. Измерения проведены с помощью ИК-анализаторов LI 8100A (Li-corInc., США) и VaisalaGMP222.

Для исследования температурной чувствительности почвенного ОВ были отобраны образцы серой лесной почвы с разной глубины почвенного профиля (0 - 40 см) двух видов экосистем типичных для Красноярской лесостепи: лесной поляны и сосняка. Все образцы были просеяны через сито диаметром 1 мм для гомогенизации и удаления корней больших размеров. Образцы каждого горизонта отдельного были распределены по 16 стеклянным сосудам объемом 0,5 л, по 100 г почвы в каждом. В каждые четыре сосуда было добавлено по 10 мл либо воды (контроль) либо раствор нитрата аммония водных концентрацией 48620 мкг/100 г. Далее сосуды помещались в инкубатор с Пельтье-охлаждением и программируемым температурным режимом фирмы Memmert (Memmert, Germany). Каждый сосуд соединялся через 16-портовый мультиплексер Li-Cor 8150 с

инфракрасным анализатором CO₂ Li-Cor 8100 (Li-Cor Incorporated, Lincoln, Nebraska).

Основные результаты. Обобщенные данные анализа изотопного состава парниковых газов и их источников приведены на рисунке 12. В силу слабых различий между источниками ПГ, проведенный нами анализ указывает на сложность разделения сигналов антропогенных выбросов CO₂ и его эмиссий из природных экосистем территории исследований. Тем не менее, фиксируемое в глобальном масштабе и на базе обсерватории ZOTTO «облегчение» состава атмосферного CO₂ (снижение величин δ¹³C-CO₂) позволяет заключить об увеличении вклада от сжигания органического вещества ископаемых топлив и/или росте его минерализационных потоков в природных экосистемах. Наряду с новым ростом концентраций метана в атмосфере, начавшимся в 2007 г., также наблюдается «облегчение» его изотопного состава (снижение величин δ¹³C-CH₄). Однако в виду более «тяжелых» значений C-CH₄ в природном газе Сибири рост его концентраций в атмосфере имеет более сложный генезис и, вероятно, обусловлен микробиологическими источниками, напр. эмиссиями из гидроморфных ландшафтов [27]. **Крайне перспективным решением проблемы разделения источников ПГ в атмосфере Сибири является анализ возраста диоксида углерода и метана на основе радиоуглеродного датирования [32, 33].**

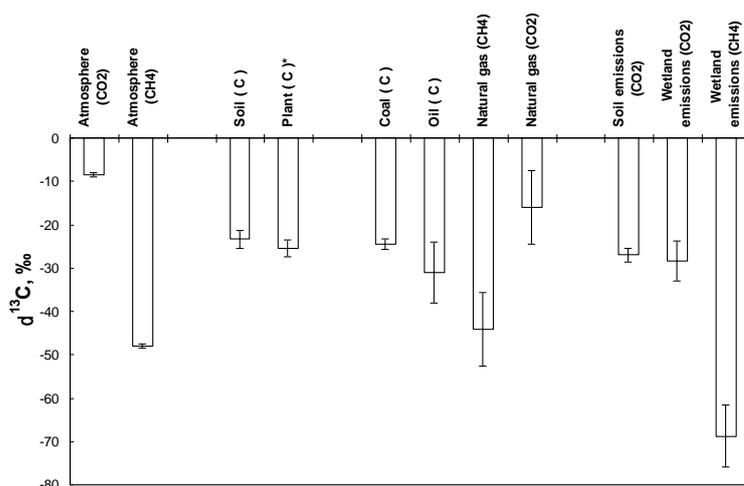


Рисунок 12 – Изотопный состав углерода парниковых газов атмосферы (данные обсерватории ZOTTO), углерода почвенного покрова и растительности, ископаемых видов топлива (уголь, нефть и природный газ) и эмиссионных потоков из естественных экосистем Средней Сибири. * - C3 растения.

Для лесовосстановительной сукцессии сосняков (1, 14, 46, 90 и >200 лет после пожарного воздействия) показана сходная динамика эмиссионного потока CO₂ с поверхности почвы в течение безморозного периода с пиковыми значениями в середине июля (Рис. 13), как следствие температурного эффекта при благоприятном водном режиме 2019 г. Прохождение низового пожара (июль 2018 г.) стало причиной снижения эмиссионного потока CO₂ с поверхности почвы в 2019 г. более чем в 4 раза. В перегушенных сосновых молодняках (возраст около 40 лет) наблюдается восстановление исходных значений дыхания почвы. Средние за сезон значения эмиссионных потоков диоксида углерода на грядах олиготрофного болота и в старовозрастных сосняках лишайниковых характеризуются близкими величинами – 4,2±1,0 и 4,7±2,0 мкмоль/м²/с, соответственно. Внесение доз азота от 0 до 20 кг N/га не оказывало достоверного влияния на эмиссионный поток CO₂ из почвы. Рост почвенного дыхания на 40-50% наблюдался на участках с дозами свыше 50 кгN/га.

Среднесезонные эмиссионные потоки CO₂ с поверхности руч. Развилки, дренирующего лесоболотные комплексы, составили 4,9±1,3 мкмоль/м²/с (2,74-7,54 мкмоль/м²/с) (рис. 14). Существенно более низкие значения эмиссий выявлены в мочажинах олиготрофных болот – 1,8±0,2 мкмоль/м²/с и с водной поверхности озерковых комплексов – 1,2±0,4 мкмоль/м²/с.

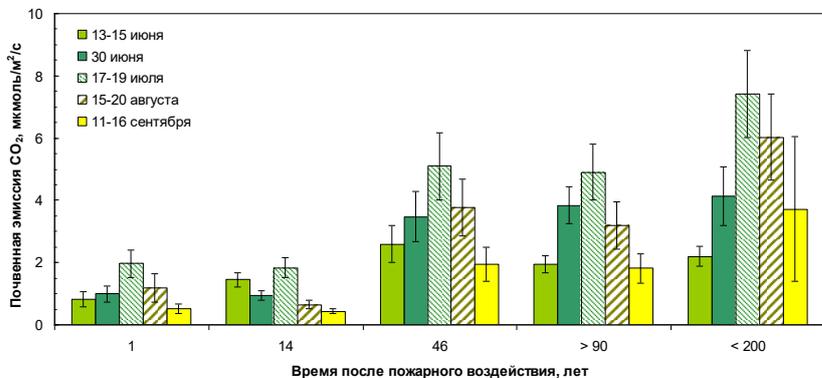


Рисунок 13 – Сезонная динамика эмиссионных потоков CO₂ с поверхности почвы для временного ряда лесовосстановительной сукцессии сосняков лишайниковых в районе обсерватории ZOTTO (1, 14, 46, 90 и >200 лет после пожарного воздействия). Данные 2019 г.

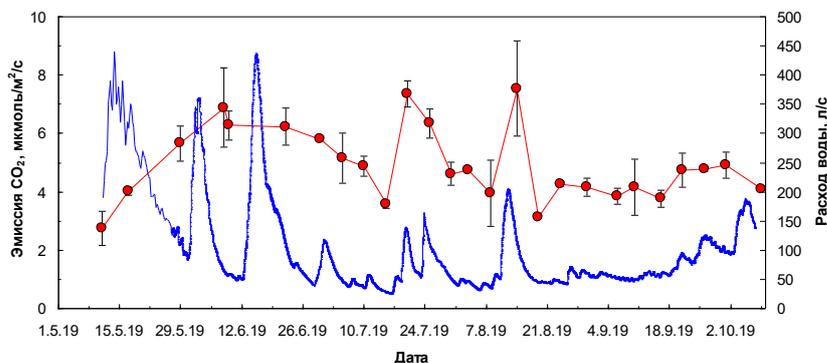


Рисунок 14 – Динамика эмиссии CO₂ с поверхности руч. Развилки и расходов воды в течение безморозного периода 2019 г.

Температурная чувствительность (Q₁₀) минерализации почвенного углерода - центральный вопрос экологии, Значения Q₁₀ для почв Сибири практически не изучены, в особенности в условиях повышенного поступления азота. Поэтому целью работы было определение влияния внесения азота на Q₁₀ минерализации углерода в серой лесной почве под сосняком и лесной поляной (рис. 15).

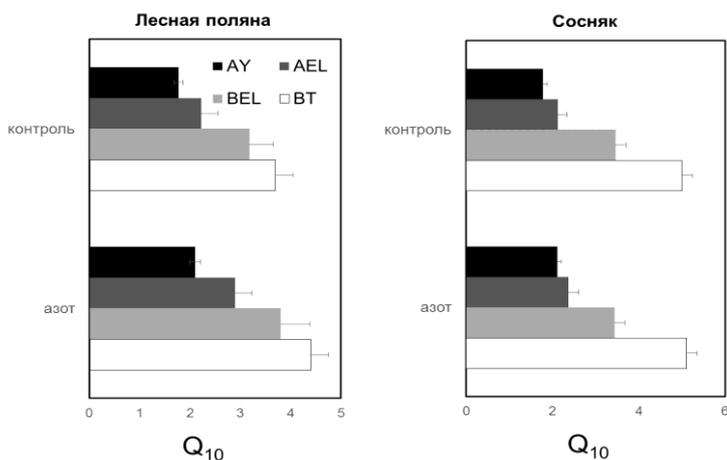


Рисунок 15 – Температурная чувствительность (Q₁₀) C-минерализации при добавлении азота и без (контроль) в почвах двух экосистем (четыре почвенных горизонта в каждой экосистеме)

Наиболее значимым фактором, определяющим вариацию температурной чувствительности минерализации почвенного

ОВ, является горизонт почвы. Q10 в обеих экосистемах увеличивалась с глубиной, что определяется меньшей доступностью органического вещества в глубоких горизонтах. Внесение азота немного, но значительно, увеличило Q10, но только в образцах почв под лесной поляной.

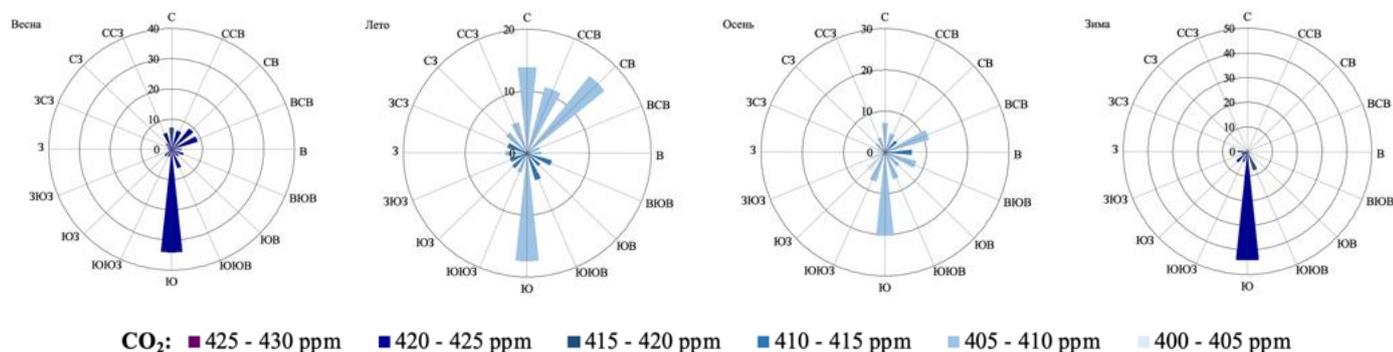
2.3 Оценка важнейших природных и антропогенных стоков и источников парниковых газов в атмосфере эстуарной зоны р. Енисей

Объекты и методика. Круглогодичный мониторинг содержания диоксида углерода, метана и водяного пара в приземной атмосфере эстуарной зоны р. Енисей в районе г.п. Диксон (73,33° с.ш.; 80,34° в.д.) проводился измерительным комплексом на основе газоанализатора Picarro G2301-f (PicarroInc., США), с отбором воздуха с микрометеорологической мачты на высоте 30 м над ур. м. Мониторинг газового состава был сопряжен с высокочастотными измерениями основных метеорологических параметров: ветровых характеристик (Gill R3-50, GillInstrumentsLtd., Великобритания), температуры и влажности воздуха (Vaisala HMP155, VaisalaCorp., Финляндия), количества осадков (TRM-525M, TexasElectronicsInc., США), солнечной радиации (CM-14, Kipp&Zonen B.V., Нидерланды). Данные измерений сохранялись на регистраторе данных Sutron 9210 XLite (SutronCorp., США). С целью идентификации источников происхождения ПГ в арктической атмосфере, проведен анализ сезонного распределения направлений ветров и соответствующих им диапазонов средних значений концентрации диоксида углерода и метана для данной мониторинговой станции.

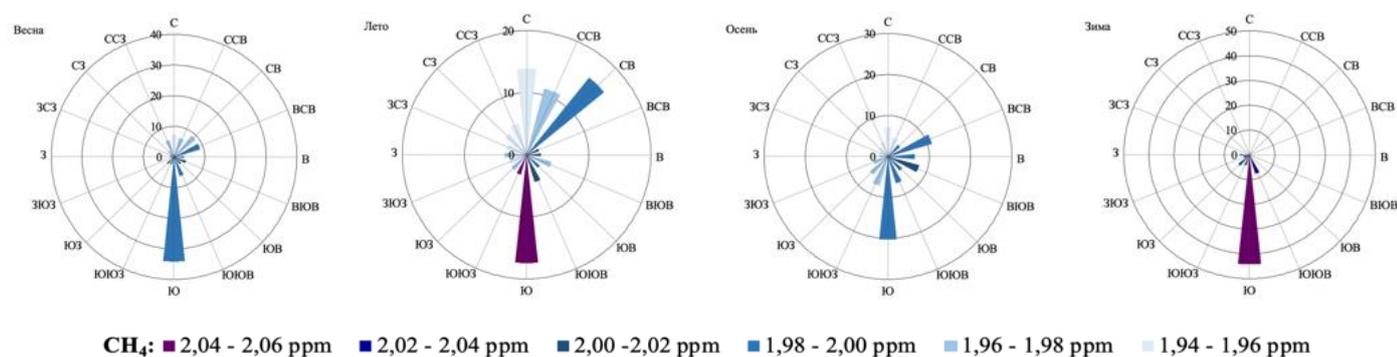
Основные результаты. В целом, в весенние и зимние месяцы для района исследований прослеживается преимущественное (до 45%) влияние континентальных воздушных масс, приходящих с юга (30%) и юго-запада (15%) – территорий западной и центральной Сибири (рис. 16 а, б). В летний период (открытая вода), вместе с сохраняющимся воздействием континентальных ВМ (24%), в газовом составе атмосферы формируется устойчивый сигнал с акватории Северного Ледовитого океана (СЛО) и Арктики (до 40%). Так, средние значения концентрации метана (1,94 – 1,96 ppm), регистрируемые в летний период при переносе ВМ с севера, можно рассматривать в качестве “фоновых” для атмосферы над СЛО и Арктикой. Отмечено их нарастание по мере смещения направлений ветра к востоку и прохождения ВМ над архипелагом Новая Земля и побережьем восточной Сибири: ССВ и СВ (рис. 16 б), до 1,98 и 2 ppm, соответственно. Содержание CO₂ в атмосферном воздухе, при этом, не изменяется и остается на уровне средних значений 405 – 410 ppm (рис. 16 а), подтверждая преимущественно природные источники формирования состава ПГ.

Природа и интенсивность воздействия континентальных источников ПГ носит сезонный характер. Так, в зимний период, повышение средних величин содержания метана (2,04 – 2,06 ppm) при переносе ВМ с юга, с сопутствующим ростом CO₂ до средних значений на уровне 420 – 425 ppm, свидетельствует об антропогенной природе происхождения таких ПГ, в частности, за счет оказываемого воздействия газовых месторождений в районе Нового Уренгоя (п-ов Тазовский). В свою очередь, в летний период, повышенные значения концентрации метана (2,04 – 2,06 ppm) отмеченные для

“южных” ВМ – не сопровождаются увеличением концентрации CO_2 (рис. 16 а), что позволяет диагностировать вклад биогенных источников в состав ПГ (до 20%): формирование CH_4 болотными экосистемами арктической тундры п-ова Таймыр. Осенний период является промежуточным, когда ВМ приходят с разных направлений, но состав ПГ отличается меньшей выраженностью, в связи с окончанием вегетационного сезона в тундре и изменениями циркуляции атмосферы



а)



б)

Рисунок 16 – Сезонное распределение (%) направлений ветра и соответствующие им диапазоны средних значений концентрации CO_2 (а) и CH_4 (б) для станции мониторинга парниковых газов атмосферы “DIAMIS” в эстуарной зоне р. Енисей.

2.4 Оценка запасов заболони в лесах умеренной и бореальной зон северного полушария

Проведен метанализ данных по запасам биомассы заболони и ее отношения к общей стволовой древесине для 25 основных древесных пород бореальной и умеренной зон. В результате исследования сформирована карта биомассы заболони в северном полушарии (рис. 17). Показано, что общая биомасса заболони составила $12,87 \pm 6,56$ Пг углерода в бореальной зоне (средняя плотность углерода: $1,13 \pm 0,58$ кгС м⁻²) и $15,80 \pm 9,10$ ПгС в умеренных лесах ($2,03 \pm 1,17$ кгС м⁻²). Пространственные закономерности соотношения биомассы заболони к стволу определяются спецификой породного состава древостоев. Представленная карта биомассы заболони послужит основой для крупномасштабных оценок дыхания и транспирации древесных растений. Значительные

пространственные различия в пропорциях биомассы заболони показывают необходимость учитывать функционально более важную заболонь, а не всю стволовую биомассу в глобальных исследованиях круговорота углерода и воды. Изменения в распределении пород деревьев, вызванные лесопользованием или изменением климата, могут оказать существенное влияние на биомассу заболони древостоев, даже если стволовая биомасса останется неизменной.

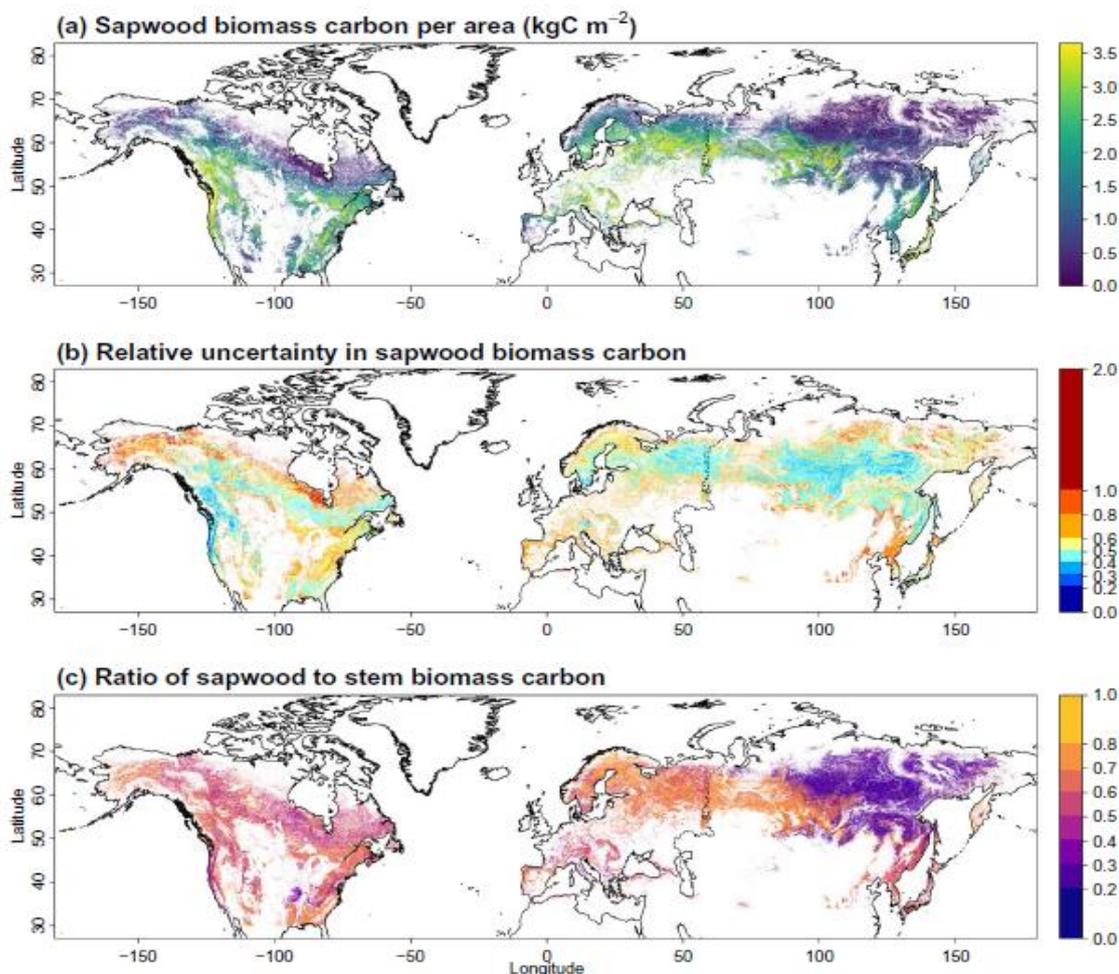


Рисунок 17. (а) Карта распределения биомассы заболони в северном полушарии, (б) Относительная неопределенность в оценке биомассы заболони и (с) соотношение заболони к общей стволовой биомассе. Маскирование нелесных участков выполнено с использованием GLC2000 [13]

Заключение. Проведенная оценка выбросов парниковых газов крупнейшими предприятиями энергетического комплекса Красноярского края не выявила снижения объемов выбросов CO₂ и CH₄ от сжигания угля и мазута в период с 2003 по 2018 гг. На отдельном предприятии (Красноярская ГРЭС-2) наблюдается тенденция к увеличению выбросов парниковых газов. Поглощение атмосферного CO₂ природными экосистемами на территории края существенно превышает его антропогенные эмиссии из 9 крупнейших источников.

В отличие от почвенного дыхания, которое имеет максимумы при наибольшем прогреве почв, эмиссионные потоки с водной поверхности водотоков коррелируют с концентрацией растворенного органического вещества ($r = 0,68$, $p < 0,05$) и расходом воды (высокая турбулентность, повышенный коэффициент переноса). Таким образом, дыхание водных систем лимитировано доступностью субстрата (органического вещества), тогда как для почвенной микробиоты большую роль играют гидротермический режим и доступность элементов минерального питания.

Круглогодичный мониторинг содержания CO_2 , CH_4 и H_2O в приземной атмосфере эстуарной зоны р. Енисей в районе г.п. Диксон в средней Сибири заполняет существующий обширный пробел в оценке текущего состояния и происходящих изменений природного баланса и климата в Арктике. Для мониторинговой станции в Арктической зоне (эстуарная зона р. Енисей) отмечено, что в весенние и зимние месяцы для района исследований прослеживается преимущественное (до 45%) влияние континентальных ВМ, приходящих с юга (30%) и юго-запада (15%) – территорий западной и центральной Сибири. В летний период (открытая вода), вместе с сохраняющимся воздействием континентальных ВМ (24%), в газовом составе атмосферы формируется устойчивый сигнал с акватории СЛО и Арктики (до 40%). Средние значения концентрации метана (1,94 – 1,96 ppm), регистрируемые в летний период при переносе ВМ с севера, можно рассматривать в качестве “фоновых” для атмосферы над СЛО и Арктикой. Природа и интенсивность воздействия континентальных источников ПГ носит сезонный характер. В зимний период отмечается воздействие газовых месторождений в районе Нового Уренгоя (п-ов Тазовский); в летний период преобладает вклад биогенных источников в состав ПГ (до 20%): формирование CH_4 болотными экосистемами арктической тундры п-ова Таймыр; осенний период является промежуточным, когда ВМ приходят с разных направлений, но состав ПГ отличается меньшей выраженностью в связи с окончанием вегетационного сезона в тундре и изменениями циркуляции атмосферы.

Результаты проводимых НИР являются уникальными и высоко востребованы мировым научным сообществом.

Раздел 3 Динамика биогенных элементов в экосистемах Центральной Сибири

Органический углерод сезонно-талого горизонта почвы, как правило, сформирован из остатков современной растительности, которая состоит из мхов, лишайников, трав, осок, кустарников и деревьев. С другой стороны, ОУ, законсервированный в вечной мерзлоте, происходит из ископаемых растительных остатков более стабилен [34]. Став доступным в результате перечисленных изменений, захороненный ОУ может служить важным источником субстратов для микробной минерализации, и, как следствие, выброса парниковых газов в атмосферу. Из-за масштабного оттаивания в результате потепления климата и последующего увеличения микробной активности захороненные почвы могут превращаться из стока углерода в его источник [35, 36].

Обменные катионы служат ближайшим резервом элементов минерального питания растений, так как их легко поглощают корневые системы. Емкость катионного обмена (ЕКО) является ключевым свойством почвы и отражает способность почвы хранить и удерживать обменные катионы (K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} и др.). Реакции катионного обмена в почвах происходят в основном вблизи поверхности частиц глины и гумуса [37]. Катионы на поверхности почвенных частиц могут легко обмениваться с катионами из почвенного раствора. Различия в составе обменных катионов могут быть вызваны генезисом почвы, специфичностью исходного материала, водным и солевым режимами [38]. Обмениваемые катионы, такие как K^+ , Ca^{2+} и Mg^{2+} , являются важными макроэлементами для питания растений [37].

Обменные катионы влияют на многие свойства почвы. Например, Ca^{2+} способствует формированию структуры почвы, вызывая коагуляцию коллоидных частиц [39] и играет важную роль в буферизации pH почвы [40]. Обменный Mg^{2+} оказывает такое же влияние на свойства почвы, как Ca^{2+} , но высокое содержание этого катиона может ухудшить структуру почвы. В отличие от Ca^{2+} , обменный Na^+ поддерживает дисперсность почвенных коллоидов. Катионы Al^{3+} и Fe^{3+} могут защищать органическое вещество почвы от минерализации, образуя биологически стабильные Al-органические и Fe-органические комплексы [41, 42] или флокулируя глинистые частицы и уменьшая подверженность органических веществ биологической атаке [43].

Таким образом, данные о содержании обменных катионов могут предоставить информацию о состоянии питания растений и потенциальной способности к стабилизации органического вещества почвы. Изучение состава обменных катионов почвенного поглощающего комплекса под разными растительными формациями и в разных климатических зонах актуально для установления специфики их биологического круговорота, и с точки зрения прогноза продуктивности и дальнейшего функционирования этих экосистем [44].

Результаты и обсуждение. Исследовано содержание обменных катионов (Ca, K, Mg, Na, Al, Fe, Mn) в почвах лесных экосистем на ключевых участках в южной, средней и северной тайге. Наибольшая величина ЕКО была установлена для почв северной тайги (участок Тура), где она достигала значений до 106,2 мг-экв/100 г в поверхностном слое почвы (0-5 см). Эффективный ЕКО в профиле почв этого участка варьировал от 21,5 до 106,2 мг-экв/100 г, в зависимости от экспозиции склона и глубины почвы. Наименьшая ЕКО отмечалась в мерзлотных почвах наиболее пониженных положений (в долине реки) с 21,5-36,6 мг-экв/100 г. Другие мерзлотные почвы этого участка имели более высокую ЕКО (35,8-106,2 мг-экв/100 г) и существенно не отличались от немерзлотных почв, которые имели ЕКО в диапазоне от 31,2 до 85,6 мг-экв/100 г.

Почвы двух участков в подзоне средней тайги характеризовались величиной ЕКО от 17,0 до 66,2 мг-экв/100 г (участок Ванавара) и от 7,3 до 78,3 мг-экв/100 г (участок

Байкит). Наибольшая ЕКО для почв средней тайги зафиксирована для мерзлотных почв в долине реки на участке Байкит (68,1 - 90,8 мг-экв/100 г). Наименьшая величина ЕКО была обнаружена для подзола суглинистого под сосной обыкновенной на участке Ванавара с 17,0-30,3 мг-экв/100 г.

В почвах южной тайги (участок Ангара) значения ЕКО варьировали от 11,4 до 34,2 мг-экв/100 г, в зависимости от типа почвы и глубины. Наибольшая ЕКО на этом участке была зарегистрирована для почв повышенных участков со значениями, варьирующими от 44,7 до 56,1 мг-экв/100 г, в зависимости от глубины.

Ca^{2+} представлял основную часть ЕКО в почвах участка Ангара (от 54,3 до 92,5% от общего ЕКО в зависимости от типа и глубины почвы). Вторым по значению обменным катионом был Mg^{2+} , который составлял от 7,2 до 35,5% от общей величины ЕКО. Наиболее мобильный K^+ вносил от 0,01 до 2,65%, но в большинстве случаев его вклад составлял не более 1% от общей ЕКО.

В почвах средней тайги (участок Байкит) вклад Ca^{2+} в общую ЕКО уменьшался. Наименьший вклад Ca^{2+} был зафиксирован для поверхностных слоев почв, формирующихся на магматических породах на повышенных элементах рельефа, где он составлял 20,1-24,3% от общей ЕКО. С увеличением глубины почвы доля Ca^{2+} в ЕКО увеличивалась до 81,8%. Вклад Mg^{2+} составлял от 3,2 до 25,2% ЕКО в этих почвах в зависимости от глубины, а Al^{3+} вносил до 73% ЕКО. Почвы других элементов рельефа в средней тайге (участки Байкит и Ванавара) характеризовались более высоким вкладом Ca^{2+} в общую ЕКО (41,4–85,7%), но этот вклад был ниже, чем для почв южной тайги (участок Ангара). Все почвы, образованные на магматических породах, характеризовались высоким вкладом Al^{3+} , особенно в более кислом верхнем слое почвы 0-5 см.

В почвах северной тайги (участок Туры) на долю Ca^{2+} и Mg^{2+} приходилось 44,2 - 86,6% и 13,2 - 28,5% общей ЕКО соответственно, ее величина варьировала в зависимости от типа почвы и глубины. Вклад Al^{3+} составлял 0,03 - 1,5% в почвах развивающихся на вечной мерзлоте и 0,07 - 33,9% в немерзлотных почвах, в зависимости от глубины. Наиболее высокое содержание обменного Ca^{2+} было зафиксировано в почвах северной тайги (участок Тура) в верхнем слое 0-5 см (до 88,7 мг-экв/100 г). В почвах северной и частично средней тайги (участки Тура и Ванавара) содержание обменного Ca^{2+} выше, чем на других исследованных участках, и его количество варьирует от 23,0 мг-экв/100 г до 88,7 мг-экв/100 г, в зависимости от глубины почвы. В почвах участка Ангара (южная тайга) и участка Байкит (средняя тайга) содержание обменного Ca^{2+} было ниже (от 4,9 до 38,4 мг-экв/100 г и от 3,2 до 30,9 мг-экв/100 г, соответственно). Исключение представляла собой почва наиболее пониженных элементов рельефа, которая характеризуется близким залеганием вечной мерзлоты. В этой почве (OxuaquicCryosol) было зафиксировано самое высокое содержание обменного Ca^{2+} среди всех изученных почв Байкита. Содержание Ca^{2+} в этой почве составляло от 58,4 мг-экв/100 г до 74,6 мг-экв/100 г, и изменялось в зависимости от глубины. Почвы северной тайги (участок Тура) также отличались наиболее высоким содержанием обменного Mg^{2+} (от 5,6 до 20,3 мг-экв/100 г). Два участка в средней тайге отличались друг от друга по обменному Mg^{2+} : в почвах участка Ванавара содержание обменного Mg^{2+} было выше, чем в почвах участка Байкит (4,1-13,7 мг-экв/100 г и 0,64-9,6 мг-экв/100 г, соответственно). В почвах южной тайги содержание обменного Mg^{2+} составляет от 2,2 до 9,6 мг-экв/100 г. Наиболее высокое содержание обменных оснований (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ и Na^+) отмечалось в почве участка Тура (северная тайга). В почвах этого участка сумма обменных оснований колебалась от 21,4 до 105,9 мг-экв/100 г, в зависимости от глубины почвы. Почвы в южной тайге характеризовались значительно меньшей величиной суммы обменных оснований, которая составляла от 6,9 до 56,0 мг-

экв/100 г для всех изученных почв и от 17,5 до 56,0 мг-экв/100 г для почв, развивающихся на магматических породах, в основном долерите. Почвы двух участков в средней тайге отличались друг от друга по содержанию обменных оснований: в почвах участка Байкит сумма обменных оснований составляла от 3,9 до 85,8 мг-экв/100 г, а в почвах участка Ванавара - 16,5-65,9 мг-экв/100 г. В целом ЕКО в почвах южной тайги (участок Ангара) был меньше, чем в средней и северной тайге. Наиболее высокая ЕКО отмечена в почвах северной тайги (участок Тура). Двухвыборочный t-тест с различными дисперсиями показал достоверность различий величины общей ЕКО для почв южной тайги и почв северной тайги. Почвы южной тайги значимо отличаются также от почв участка Ванавара в средней тайге, но не отличаются от почв участка Байкит в этой же подзоне ($p < 0,05$). Почвы трех других участков (Ванавара, Байкит и Тура) значимо отличаются друг от друга ($p < 0,05$). Почвы южной тайги, формирующиеся на изверженных породах, значительно отличаются от всех других участков. Почвы на магматических породах на участке Тура не отличаются от почв на участке Ванавара.

Почвы южной и частично средней тайги характеризуются наиболее низкими запасами обменных катионов (12630-12960 мг-экв м⁻²) (рис. 18). Наибольший запас обменных катионов был обнаружен в немерзлотных почвах северной тайги (44869 мг-экв м⁻²), в то время как мерзлотные почвы на этом участке имели средние значения запасов (25070 мг-экв м⁻²), сопоставимые с почвами на участке Ванавара. В целом, эти запасы можно считать очень высокими, и нельзя предполагать дефицит катионов для питания древесной растительности.

Гранулометрический состав почвы является одним из параметров, которые оказывают большое влияние на величину ЕКО. Возможной причиной относительно невысоких значений ЕКО в некоторых случаях может быть более легкий гранулометрический состав почв, образовавшихся на песке или алевролите. Эти почвы отличаются более высоким содержанием песка и более низким содержанием глинистых частиц. Корреляция между содержанием глины и общей ЕКО для всех почв южной тайги составила 0,56 ($p < 0,05$). Для почв, формирующихся на изверженных горных породах, эта связь была более сильной ($R = 0,65$, $p < 0,05$). Согласно Ванг и соавт. [45] существует положительная корреляция между ЕКО, содержанием органического углерода в почве ($R^2 = 0,34$) и содержанием глины в почве ($R^2 = 0,59$). Отрицательная корреляция наблюдалась между ЕКО и содержанием песка ($R^2 = 0,43$).

Обменный комплекс почв южной тайги имеет очень высокую степень насыщенности обменными основаниями (88,6-99,9%), которая увеличивалась с увеличением глубины почвы. Вклад обменных оснований в почвах средней тайги варьирует в более широком диапазоне: от 24,1 до 36,7% в поверхностном слое почв, формирующихся на магматических породах на повышенных элементах рельефа, 62,0 - 99,9% в нижних горизонтах этих почв и в почвах других позиций и генезиса. Почвы в северной тайге также имели достаточно высокую степень насыщенности основаниями (64,9 - 99,9%).

Корреляционный анализ показал, что на участке Ангара, содержание органического углерода в значительной степени зависело от обменных Al^{3+} и Ca^{2+} ($R = 0,50$ и $0,41$, соответственно), что указывает на стабилизацию органического вещества почвы путем образования катионных связей между глинистыми минералами и органическим веществом. Эти почвы также показали сильную корреляцию между содержанием Ca^{2+} и соотношением C / N ($R = 0,66$, $p < 0,05$).

Содержание углерода в почвах средней тайги (участок Байкит) коррелировало с ЕКО ($R = 0,54$, $p < 0,05$) и с обменным Ca^{2+} ($R = 0,40$, $p < 0,05$). Почвы в северной тайге

(участок Тура) также показали значительную корреляцию между органическим С и обменным Al^{3+} ($R = 0,51$, $p < 0,05$).

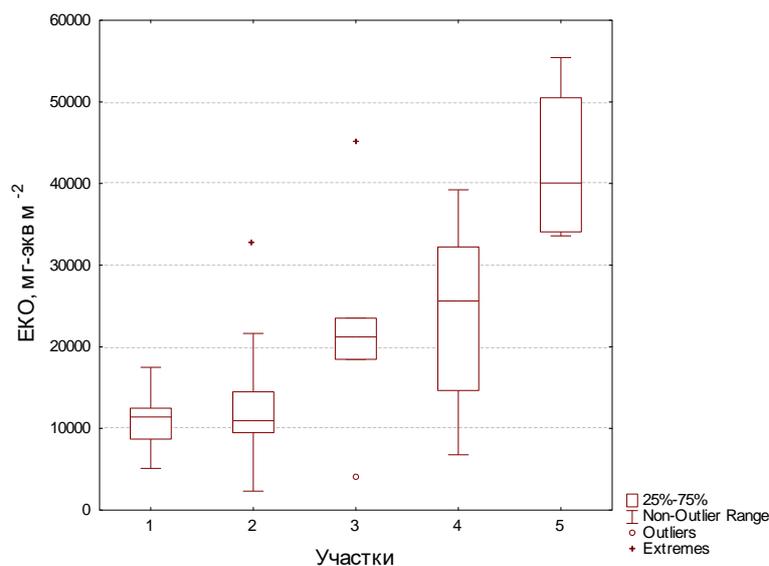


Рисунок 18. Запасы обменных катионов в почвах различных природных зон: 1– южная тайга (участок Ангара); 2– средняя тайга (участок Байкит); 3 – средняя тайга (участок Ванавара); 4 – северная тайга мерзлотные почвы; 5 – северная тайга немерзлотные почвы, 25%-75% - 1-3 квартили, Non-OutlierRange – 95% доверительный интервал, Outliers и Extremes – значения, выходящие за пределы доверительного интервала.

Исследована динамика выделения парниковых газов (CO_2 , CH_4) из полевого инкубационного эксперимента с захороненной почвой в зоне сплошного распространения вечной мерзлоты (тундровая экосистема, дельта р. Лена, о. Самойловский). Эксперимент заложен в 2015-2016 гг. Данные четырехлетних наблюдений за экспериментом показали, что эмиссия парниковых газов находилась в прямой зависимости от температуры верхних горизонтов почвы (0-7 см). В течение трехлетнего периода после начала эксперимента вовлеченность захороненной почвы в процессы микробного разложения в текущих природных условиях была очень низкой, о чем свидетельствовали недостоверные различия между величинами эмиссии газов из экспериментальных площадок и площадок контроля нарушений. Достоверно значимый вклад разложения захороненной почвы в эмиссию CO_2 был зарегистрирован через четыре года после начала эксперимента для варианта имитации криотурбационных процессов, и через три года для варианта имитации береговой эрозии. Величины эмиссии CH_4 в варианте эксперимента, имитирующей криотурбацию, недостоверно различались с контролем нарушений на протяжении всего периода наблюдений за экспериментом, а в варианте эксперимента по имитации береговой эрозии достоверно начали различаться от контрольных через два года после начала эксперимента, но были чрезвычайно низкими (рис. 19). В целом, эмиссия CO_2 погребенной почвой в эксперименте, имитирующем криотурбационные процессы, составляла 51 ± 49 $mgCO_2$ /сут/кг, в эксперименте, имитирующем береговую эрозию, $18,9 \pm 8,3$ $mgCO_2$ /сут/кг¹; эмиссия CH_4 , составила $0,027 \pm 0,054$ $mgCH_4$ /сут/кг и $0,044 \pm 0,040$ $mgCH_4$ /сут/кг.

Установлено, что почвы северной тайги (ключевой участок Тура) имеют самую высокую емкость катионного обмена, при этом почвы, развивающиеся на мерзлоте, отличаются от немерзлотных почв в этой зоне. Почвы южной тайги (ключевой участок Ангара) характеризуются более низким содержанием обменных катионов. Содержание органического углерода в почвах южной и средней тайги в значительной степени связано с содержанием основных катионов, в то время как содержание органического углерода в почвах северной тайги имеет тесную связь с содержанием обменного алюминия. В целом,

запасы обменных катионов во всех исследованных почвах оцениваются как достаточно высокие для обеспечения древесной растительности данными элементами минерального питания.

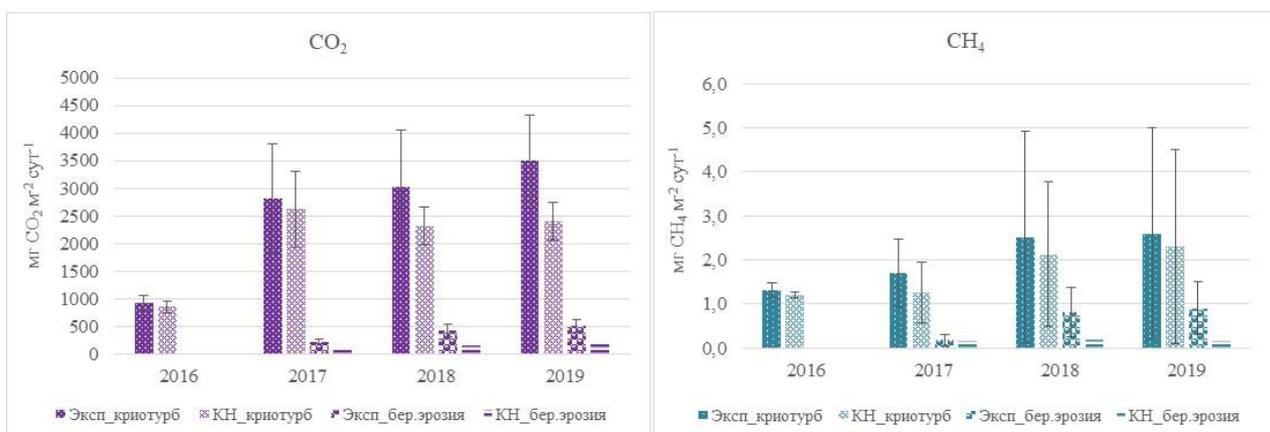


Рисунок 19. Эмиссия парниковых газов (CO₂, CH₄) в полевом инкубационном эксперименте с захороненной почвой.

Обозначения: *Эксп_криотурб* – вариант эксперимента с захороненной почвой, помещенной под напочвенный покров; *КН_криотурб* – контроль нарушений; *Эксп_бер.эрозия* – вариант эксперимента с захороненной почвой, инкубирующей на поверхности; *КН_бер.эрозия* – контроль нарушений. Планки погрешностей – стандартное отклонение, n=3.

Показано, что захороненная почва, вовлеченная в криотурбационные процессы, в полевом инкубационном эксперименте с захороненной почвой мерзлотной экосистемы Восточной Сибири, выделяет в 2,7 раза больше CO₂, чем почва, оттаивающая при береговой эрозии. В то же время, эмиссия метана при береговой эрозии в 1,6 раза превышает таковую в криотурбированных почвах. Тем не менее, величины эмиссий парниковых газов (CO₂, CH₄) из вовлекаемой в круговорот захороненной почвы начинают достоверно превышать эмиссию газов из сезонно-талого горизонта только на третий год после оттаивания.

Раздел 4. Оценка воздействия климатических и локальных экологических факторов на жизненное состояние и продуктивность древостоев методами дендрозологии

По годичным кольцам древесных растений и их анатомическим характеристикам имеется возможность исследовать динамические процессы в лесных экосистемах на длительных интервалах времени, влияние на рост деревьев внешних факторов разной природы [46, 47]. Возможности древесно-кольцевых хронологий являются основой для широкого их использования в экологическом мониторинге, а также в физиологических исследованиях реакции растительных организмов на изменение внешней среды [48, 49, 50].

На фоне текущего изменения климата усыхание и гибель хвойных древостоев получили повсеместное распространение [6]. Причину усыхания исследователи видят в том, что деревья в современной климатической ситуации часто испытывают водный дефицит, вызывающий «сдвиг» водного баланса и нарушение процесса водопроведения [8, 17 и др.]. Засуха — важнейший фактор, который прямо воздействует на водный режим деревьев и через него определяет их выживание, жизненное состояние и интенсивность роста [51]. Информация об этих процессах содержится в годичных кольцах древесных растений и их анатомических характеристиках.

Проведенные в 2019 г. исследования воздействия климатических и локальных экологических факторов на жизненное состояние и продуктивность древостоев являются актуальными, соответствующими мировому уровню. Исследования базируются на использовании современных методов дендрозологии и ксилотомии.

4.1 Пространственно-временная асинхронность изменений погодных условий после мощных вулканических извержений по характеристикам годичных колец

Вулканические извержения приводят к существенным изменениям радиационного баланса, атмосферных температур и региональных погодных условий, что в свою очередь оказывает влияние на состояние глобальной климатической системы. Эти изменения в большинстве случаев приводят к глобальному похолоданию в течение нескольких лет после событий. На основе построенных хронологий отклика лиственницы на северо-востоке Якутии (YAK), востоке Таймыра (TAY) и Алтае (ALT) на климатические аномалии (температуру, количество осадков, влажность воздуха, солнечная радиация и др.), отражающиеся в разных параметрах годичных колец деревьев: ширине годичного кольца (TRW), максимальной плотности поздней древесины (MXD), толщине клеточной стенки (CWT), соотношении стабильных изотопов ($\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$) в целлюлозе, показана пространственно-временная асинхронность изменений погодных условий после мощных вулканических извержений. Параметры годичных колец деревьев зафиксировали информацию о холодных, влажных и облачных летних аномалиях в течение VI и XIII вв. В то же время после извержений Тамбора (1815) и Пинатубо (1991) в 19 и 20 вв. аномалии погодных условий в Сибири в летний период в параметрах годичных колец деревьев не были обнаружены (рис. 20). Это подтверждает нашу концепцию о том, что не все вулканические извержения приводят к снижению температуры, уменьшению осадков и

количества приходящей солнечной радиации в глобальном масштабе во второй половине последнего тысячелетия.

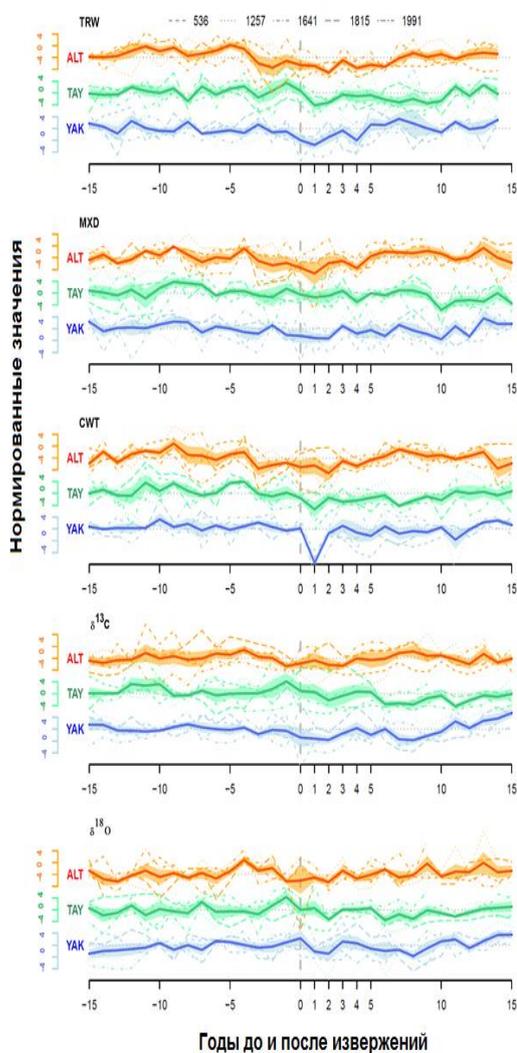


Рисунок 20 - Нормированные значения (z-score) параметров годичного кольца для каждого вулканического события (535 г., 1257 г., 1640 г., 1815 г., 1991 г.), рассчитанные методом наложенных эпох (± 15 лет до и после извержения) для северо-востока Якутии (YAK, синяя линия), востока Таймыра (TAY, зеленая линия) и Алтая (ALT, красная линия).

4.2 Связь темпов радиального роста и продолжительности жизни деревьев

В результате анализа данных по ширине годичных колец 749 живых и 1019 погибших деревьев (из них с верхней границы леса в Пиренеях — 602 живых и 506 отмерших *Pinus uncinata* Ramond ex DC. и с верхней границы леса на Алтае — 147 живых и 513 ископаемых стволов *Larix sibirica* Ledeb., произраставших в последние 1000 и 2000 лет, соответственно), было показано, что хороший радиальный прирост деревьев в молодом возрасте соответствует меньшей продолжительностью их жизни (рис. 21). Наоборот, максимальный возраст имели деревья с наименьшим приростом в первые годы жизни деревьев (корреляция значима). Более короткий жизненный цикл деревьев приводит к более короткому времени консервации поглощенного атмосферного углерода

лесными экосистемами. Таким образом, в условиях возрастания температуры при потеплении климата, которое сопровождается увеличением темпов роста деревьев и сокращением их продолжительности жизни должно происходить снижение возможности лесов накапливать углерод.

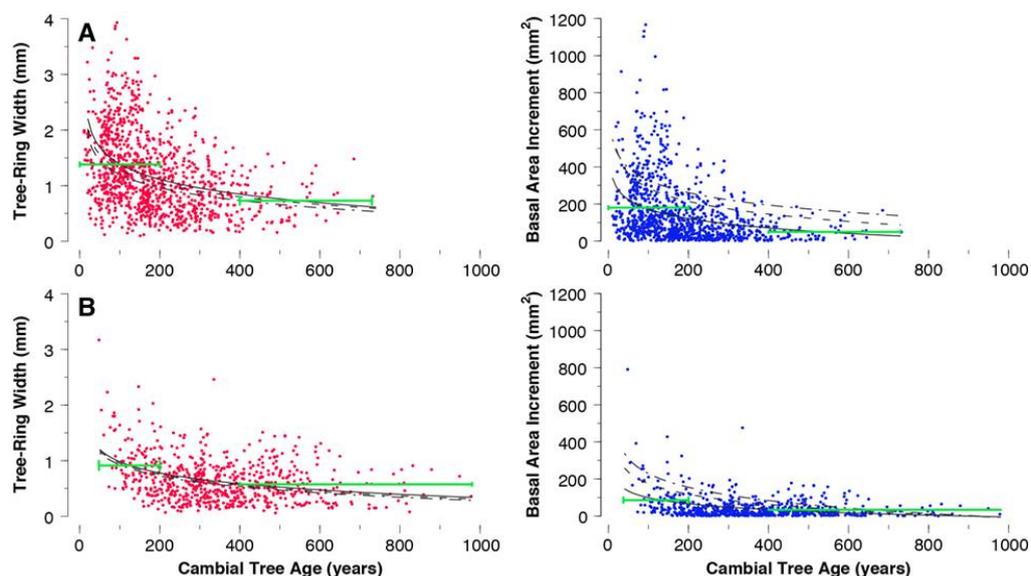


Рисунок 21 - Темпы радиального прироста и возраст деревьев. Ширина древесных колец и прирост деревьев по площади в течение первых 25 лет (красный и синий цвет, соответственно) в (а) Пиренейских горах в Испании и (б) на Алтае (Россия). Зелеными линиями показаны средние величины для деревьев ≤ 200 и ≥ 400 лет. Сплошная и пунктирные линии указывают на средний прирост в течение первых 25, 50 или 75 лет роста.

4.3. Модификации в ксилотомическом строении у деревьев в криолитогенном лиственничнике, поврежденном суховершинностью

Проведены исследования анатомического строения древесины в заболонной, водопрводящей части на разной высоте в стволе у деревьев лиственницы Гмелина в северо-таежном древостое, поврежденном суховершинностью, произрастающем на многолетнемерзлых почвах. Выявлены тенденции изменения характера распределения по размерам клеточных характеристик в направлении от комля к верхушке у суховершинных и здоровых деревьев. Средний размер люмена трахеид и толщина их стенок уменьшается по высоте ствола как у здоровых, так и у суховершинных деревьев, но у последних в большей степени. Так, средний размер люмена и толщина стенки в верхней части ствола (у верхушки) у здоровых деревьев в 1,2 и 1,4 раза меньше, чем на $\frac{1}{4}$ высоты ствола (соответственно), а у суховершинных деревьев в — 1,5 и 2 раза меньше, чем на $\frac{1}{4}$ высоты ствола (в том и другом случае различия достоверны при $P \geq 0,95$).

В направлении от комля к верхушке характер распределения трахеид по размерам люменов у здоровых деревьев изменяется за счет правого крыла. У верхушки доля клеток с крупными люменами (20-35 мкмк), которые более эффективны для водопроведения, увеличивается, а у суховершинных деревьев, наоборот, доля крупных клеток у комля —

выше, чем у верхушки. Толщина стенок у суховершинных деревьев вблизи сухой верхушки существенно меньше: 90% трахеид имеют стенку 2-3 мкм (рис. 22). На основе того, что размер люмена — косвенная характеристика водного потенциала, утверждается, что суховершинность в древостоях — следствие острого водного дефицита.

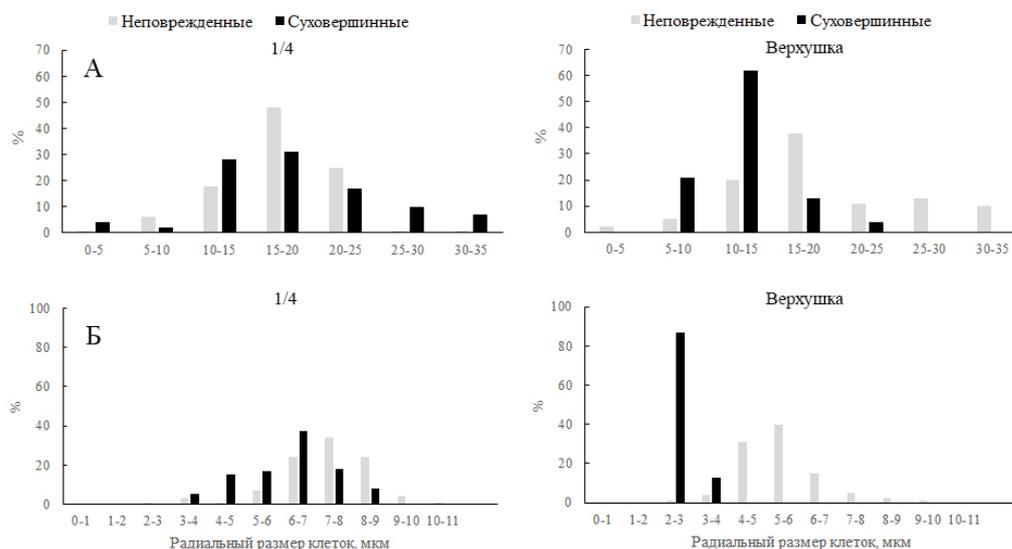


Рисунок 22 - Распределение трахеид по радиальному размеру люменов (А) и толщине стенки (Б) в заболонной части на 1/4 высоты и у верхушки суховершинных и здоровых деревьев лиственницы Гмелина (1999-2009 гг.)

Таким образом, на основе дендроклиматического анализа хронологий радиального прироста показана пространственно-временная асинхронность изменений погодных условий после мощных вулканических извержений. Показано, что с увеличением темпов роста деревьев происходит сокращение их продолжительности жизни, что, как следствие, при потеплении климата приведет к снижению способности лесов депонировать поглощенный углерод. Ксилотомический анализ выявил специфические для роста на многолетней мерзлоте тенденции изменения клеточных характеристик ксилемы и, соответственно, ее функциональных свойств в направлении от комля к верхушке у деревьев лиственницы, а также характерные модификации в анатомическом строении ксилемы у усыхающих деревьев в суховершинных криогенных лиственничниках, появившиеся в конце 1980-х (с начала заметного регионального потепления). Они характеризуют изменение строения и функционирования водопроводящей системы и подтверждают наличие острого водного дефицита; который у более «чувствительных» к нему деревьев является причиной появления суховершинности.

Раздел 5. Разработка автоматизированных методов классификации и пространственного моделирования лесного покрова

Для автоматизации процесса классификации и картографирования растительного покрова требуется использование объективных количественных критериев. Эта проблема успешно решается при создании классификации растительного покрова в рамках географо-генетического подхода [52]. Изучаемая территория дифференцируется на участки, однородные по топографическому положению и сочетанию элементов или форм мезорельефа, и, следовательно, по экологическим режимам, создающим определенный лесорастительный эффект. Генетический принцип классификации проявляется в том, что все насаждения в пределах относительно однородной по топологическому положению территории объединяются общностью происхождения, то есть рассматриваются как возрастные стадии характерного для этих условий коренного насаждения. Коренные и производные типы насаждений группируются в восстановительный ряд растительности – тип леса, то есть ряд генетически связанных и последовательно сменяющихся насаждений, которые развиваются в пределах определенного типа лесорастительных условий [52, 53]. Процесс дешифрирования космических изображений базируется на известной схеме, включающей предварительную обработку, сегментацию, классификацию и интерпретацию, анализ точности изображений [54].

Наряду с классическим (попиксельным) подходом для классификации ДДЗ в нашей работе используется объектно-ориентированный подход. Основным отличием данного подхода является использование в качестве минимальной операционно-территориальной единицы однородных областей (сегментов или пространственных кластеров) образованных пикселями исходного изображения. При этом процесс формирования сегментов (сегментация) является управляемым. Оператор может управлять размером и формой создаваемых сегментов, что в свою очередь позволяет управлять детальностью (степенью генерализации) итоговой тематической карты. Применение объектно-ориентированного подхода хорошо себя зарекомендовало при автоматизированном дешифрировании данных высокого пространственного разрешения [55].

Методика. Реализована методика (рис. 23) автоматизированного объектно-ориентированного контурного дешифрирования космической съемки высокого пространственного и спектрального разрешений, цифровой модели рельефа с использованием программных пакетов TrimbleCognition 8 и ESRI ArcGIS 10.

Исходными данными для реализации методики являются: мультиспектральные данные ДЗ, цифровая растровая модель рельефа (ЦМР), полевые опорные таксационные характеристики насаждений (новые полевые пробные площади, эталонные выделы прошлого лесоустройства). Учитывая современные требования к пространственной точности, как правило, необходима дополнительная геометрическая коррекция полученных данных ДДЗ с использованием опорных точек привязки и ортотрансформации на основе ЦМР. Для повышения точности автоматизированной оценки характеристик растительности можно использовать дополнительные производные от спектральных признаков: зональные отношения (вегетационные индексы) и характеристики пространственной изменчивости (текстура и форма). На основе исходной высоты по ЦМР (ASTER GDEM) рассчитываются дополнительные растровые слои крутизны и экспозиции склонов ($a, ^\circ$), а также двухслойное изображение: $\sin(a)$, $\cos(a)$, где a – величина угла экспозиции пикселя, измеряемая в градусах относительно направления на север.

Предложен метод формирования эталонных выборок на базе совместного анализа лесоустроительных выделов прошлого лесоустройства и спутникового изображения

современной ситуации. С целью повышения статистической достоверности связи дистанционных оптических признаков выдела (сигнатура выдела) с дискретными характеристиками из лесотаксационной базы данных необходимо для эталонной выборки отобрать выдела, наиболее однородные по пространственной структуре. Карты уровня однородности выделов (дисперсии признаков сигнатур выделов), совмещенные с композитным изображением спутниковой сцены, потенциально позволяют сделать это. Для эталонных выборок отбираются только относительно однородные выделы с заданным уровнем величины среднеквадратичного отклонения яркости. Эталонные выделы группируются по принадлежности к информационным классам, представляющих сочетания основных характеристик насаждений (тип леса, породный состав, полнота, возраст и запас преобладающей породы).

Многоканальные изображения ДДЗ-композиции (спектральные и текстурные слои) подвергаются двухуровневой автоматической сегментации. При этом первый (детальный) уровень детализации (размера) сегментов определяется минимальной допустимой площадью однородного участка насаждения, выделяемого на данном исходном изображении. На этом этапе также выполняется одноуровневая сегментация многоканальных изображений ЦМР-композиции (высота, крутизна, $\sin(\text{эксн.})$, $\cos(\text{эксн.})$). Размер сегментов зависит от исходного разрешения используемой ЦМР и заданной минимальной площади выделов при заданном разряде работ. Для каждого сегмента рассчитываются средние значения вышеуказанных характеристик рельефа для последующей классификации. Описанный этап может быть опущен для равнинных территорий и участков со слабо выраженным рельефом.

Отобранные на предыдущих этапах эталонные выделы совмещаются с полученными сегментами всех уровней, при этом оценивается необходимость и координаты закладки новых пробных площадей внутри сегментов детального уровня в местах отсутствия достоверной эталонной информации из архивных данных. Эталонные выделы выбираются также с учетом транспортной доступности из множества предварительных кандидатов.

Таксационные описания, сформированные в ходе новых полевых работ, анализируются с целью выделения наиболее представленных сочетаний основных таксационных признаков (категория земель, породный состав, тип леса, полнота, группа возраста). В результате формируется набор эталонных сегментов детального уровня, составляющий 1-5 % от общей площади объекта дешифрирования.

Полученные сегменты рассматриваются как операционно-территориальные единицы, для которых решается задача отнесения к тематическим классам на основании вычисленных для них характеристик (средних значений и дисперсий в каналах признаков ДДЗ и ЦМР). Для этого используется заданная эталонная тематическая информация, позволяющая отнести сегменты обучающей выборки к тому или иному тематическому классу, и математические методы дискриминации, а именно линейный или квадратичный дискриминационный анализ (ScanExImageProcessor, модуль «Тематик Про»).

Полученные генерализованные выделы накладываются на тематически классифицированные базовые (детальные) сегменты, при этом выполняется автоматизированное формирование таксационного описания генерализованных выделов, в которое классы (категории земель и породы) базовых сегментов заносятся с коэффициентами состава, пропорциональными их площади в составе объединяющего их генерализованного выдела. Автоматически сформированные выделы и их описания проверяются экспертом-таксатором, который вносит необходимые правки в машинный вариант. Проверенный и отредактированный картографический слой выделов проходит

этапы автоматического сглаживания (упрощения) и увязки границ, а также этап автоматической нумерации.

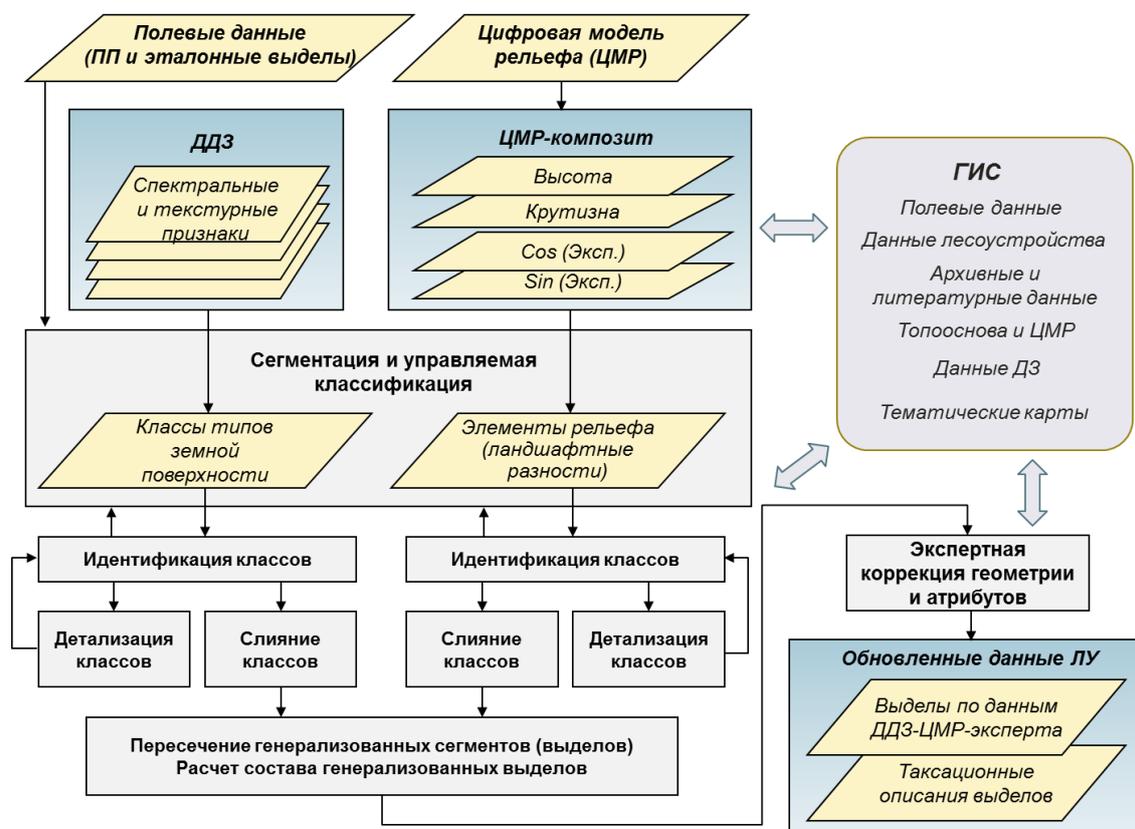


Рисунок 23 - Блок-схема методики автоматизированного картографирования лесотаксационных выделов

Результаты Разработка и совершенствование предлагаемой методики осуществлялось в процессе работ, выполняемых по второму разряду лесоустройства для территорий заповедников «Саяно-Шушенский» (площадь ~ 390000 га, рельеф горный), «Кузнецкий Алатау» (площадь ~ 400000 га, рельеф горный) и на арендном участке «Карат» (площадь ~ 42000 га, рельеф равнинный), расположенных в районах Центральной и Южной Сибири

Картографирование осуществлялось на основе мультиспектральной спутниковой съемки (ДДЗ-композиции): Rapideye (5 каналов, разрешение 5 м) и WorldView-2 (4 канала, разрешение 0.5 м). В качестве дополнительной информации использовались векторные слои лесоустройства с границами лесотаксационных выделов и кварталов, а также материалы полевых исследований. Для картографирования лесорастительных условий по топографическим характеристикам была использована цифровая модель рельефа (ЦМР) местности ASTER GDEM2 с разрешением 20 м в пикселе. На основе ЦМР были рассчитаны двухслойные растровые изображения (ЦМР-композиции): Sin(a) и Cos(a), а – угол солнечной экспозиции пикселя. Многоканальные ДДЗ- и ЦМР-композиции были подвергнуты двухуровневой автоматической сегментации с заданными уровнями пространственной детализации. Полученные ДДЗ- и ЦМР-сегменты объединялись в

единый слой базовых полигонов, которые классифицировались методом максимального правдоподобия с использованием обучающих выборок эталонных пробных площадей и выделов. Окончательное описание полигонов карты формировалось на основе лесоустроительной и полевой информации. Предлагаемый автоматизированный подход по сравнению с традиционным позволяет значительно повысить точность контурного дешифрирования и его интерпретации, снизить влияние субъективного фактора при картографировании.

Предложенная методика комбинированного анализа данных дистанционного зондирования, цифровой модели рельефа и материалов наземных обследований, позволяет в значительной мере автоматизировать процесс формирования лесотаксационных карт и описаний [56, 57 и др.].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современное потепление климата проявляется, главным образом, через аридизацию, которая явилась причиной выявленного возрастающего тренда горимости лесов и усыхания деревьев в древостоях. Установлено, что усыхание распространено преимущественно в южной части ареалов кедра и пихты в низкогорьях на элементах рельефа с максимальным риском водного стресса, где высока вероятность их замещения толерантными к засухе. У усыхающих деревьев в криогенных лиственничниках выявленные характерные модификации в анатомическом строении ксилемы, появившиеся в конце 1980-х (с начала заметного регионального потепления), характеризуют изменения функционирования водопроводящей системы, связанные с наличием острого водного дефицита, который может быть причиной усыхания верхушек.

Значение инвентаризации парниковых газов – в поиске путей их сокращения. Поглощение атмосферного CO₂ природными экосистемами на территории края существенно превышает его антропогенные эмиссии из 9 крупнейших источников. Величины эмиссий парниковых газов (CO₂, CH₄) из вовлекаемой в круговорот захороненной почвы начинают достоверно превышать эмиссию газов из сезонно-талого горизонта только на третий год после оттаивания.

Вклад в оценку текущего состояния и происходящих изменений природного баланса и климата в Арктике посредством проведения круглогодичного мониторинга содержания CO₂, CH₄ и H₂O в приземной атмосфере эстуарной зоны р. Енисей в районе г.п. Диксон заполняет обширный пробел в систематических наблюдениях за парниковыми газами в полярных широтах и Российской Арктике.

Определено содержание обменных катионов (Ca, K, Mg, Na, Al, Fe, Mn) в почвах лесных экосистем на ключевых участках в южной, средней и северной тайге. На основе этих данных была рассчитана емкость катионного обмена и оценена степень насыщенности основаниями почв исследуемых регионов.

В полевом инкубационном эксперименте с захороненной почвой мерзлотной экосистемы Восточной Сибири определена суммарная величина эмиссии парниковых газов (CO₂, CH₄) за четыре вегетационных периода. Показано, что захороненная почва, вовлеченная в криотурбационные процессы, выделяет в 2,7 раза больше CO₂, чем почва, оттаивающая при береговой эрозии. В то же время, эмиссия метана при береговой эрозии в 1,6 раза превышает таковую в криотурбированных почвах.

Результаты дендроэкологических исследований на многолетней мерзлоте могут быть использованы в расчетах динамики развития древостоев и прироста биомассы при разных сценариях изменения климата: при потеплении или похолодании.

Разработки автоматизированных методов классификации и пространственного моделирования лесного покрова выполненные на современном программном

обеспечении, на базе ГИС-технологий — современном методе хранения, обработки и картографического представления данных, позволят оперативно модифицировать картографические модели в результате обновления исходной информации, что особенно актуально для обширных таежных регионов Сибири.

Результаты, полученные при выполнении Проекта-2019, являются уникальными и высоко востребованы мировым научным сообществом. Они могут быть использованы и уже используются в настоящее время для ретроспективного выделения факторов климатического, антропогенного и экстраординарного характера и анализа воздействия их на растительный мир Земли. Примененные при выполнении НИР методические подходы соответствуют современным мировым стандартам, а результаты, большая часть из которых получена впервые, могут быть отнесены к лучшим научным достижениям в рамках искомой тематики.

СПИСОКИСПОЛЬЗОВАННЫХИСТОЧНИКОВ

1. IPCC, 2007: Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch et al. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., – 2007, – 851 pp.
2. IPCC, 2013: Climate Change 2013: Mitigation. Working group I contribution to the IPCC fifth assessment report climate change 2013: the physical science basis. Chapter 10: Detection and Attribution of Climate Change: from Global to Regional / J Bartholy, R. Vautard, T. Yasunari eds. Cambridge University Press, Cambridge, UK, – 2013. – 132 p.
3. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов не регулируемых Монреальским протоколом за 1990 – 2014гг. М., 2016.
4. Araújo M. B., Thuiller W., Cabeza M., Hannah L., Williams P. Would climate change drive species out of reserves? An assessment of existing reserve-selection methods. //Global Change Biol., – 2004. – Vol. 10. – p. 1618—1626
5. Thuiller W. Patterns and uncertainties of species' range shifts under climate change. //Global Change Biol., – 2004. – Vol. 10. – p. 2020–2027.
6. Allen C. D., Macalady A. K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Vennetier M., Kitzberger T., Rigling A., Breshears D. D., Hogg E. H. et al. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests // Forest Ecology and Management. 2010. – Vol. 259. – P. 660–684.
7. McDowell N. G., Pockman W. T., Allen C. D., Breshears D. D., Cobb N., Kolb T., Plaut J., Sperry J., West A., Williams D. G., et al.. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? // New Phytol. 2008 – Vol. 178. – p. 719–739.
8. Гамалей Ю. В. Криофиты Евразии: происхождение и структурно-функциональная специфика // Ботанический журнал. –2011. – Т. 96. № 12. – С. 1521–1546.
9. Hugelius G., Strauss J., Zubrzycki S., Harden J.W., Schuur E.A.G., Ping C.L., Schirmer L., Grosse G. et al., Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty range and identified data gaps // Biogeosciences. – 2014. – Vol. 11. – P. 6573–6593.
10. Ping, C.L., Jastrow, J.D., Jorgenson, M.T., Michaelson, G.J., Shur, Y.L. Permafrost soils and carbon cycling // Soil.–2015.– Vol. 1. – P. 147–171.
11. Dao T.T., Gentsch N., Mikutta R., Sauheitl L., Shibistova O., Wild B., Schnecker

- J., Bárta J., Čapek P., Gittel A., Lashchinskiy N., Urich T., Šantrůčková H., Richter A., Guggenberger G. Fate of carbohydrates and lignin in north-east Siberian permafrost soils. // *Soil biology & Biochemistry*. – 2018. – Vol. 116. – P. 311-322
12. Schirrmeyer L., Kunitzky V.V., Grosse G., Wetterich S., Meyer H., Schwamborn G., Babiý O., Derevyagin A.Yu., Siegert Ch. Sedimentary characteristics and origin of the Late Pleistocene Ice Complex on North-East Siberian Arctic coastal lowlands and islands – a review // *Quatern. Intern.*, – 2011. – Vol. 241. – No. 1–2. – P. 3–25.
13. Bartholome E, Belward A.S. GLC2000: a new approach to global land cover mapping from Earth observation data // *International Journal of Remote Sensing*. – 2005. – Vol. 26 (9), – p. 1959-1977
- 14 Millar, C.I. Temperate forest health in an era of emerging megadisturbance/ Millar C.I., Stephenson N.L.// *Science*– 2015. Vol. – 349, – N. 6250 – P. 823–826.
<https://doi.org/10.1126/science.aaa9933>
- 15 Kharuk V.I., Im S.T., Petrov I.A., Yagunov M.N. Decline of dark coniferous stands in Baikal region. // *Contemp. Probl. Ecol.* – 2016. – Vol.9, – N 5. – P. 617–625.
- 16 Kharuk, V.I., Im, ST, Dvinskaya M.L, Ranson K.J, Petrov I.A Tree wave migration across an elevation gradient in the Altai Mountains, Siberia // *Journal of Mountain Science* – 2017. - 14 (3). – P. 442-452. DOI: [10.1007/s11629-016-4286-7](https://doi.org/10.1007/s11629-016-4286-7).
- 17 Anderegg, L.D.L. Tree physiology review: not all droughts are created equal: translating meteorological drought into woody plant mortality / Anderegg L.D.L, Anderegg W.R.L., Berry J.A. // *Tree Physiol.* – 2013. – Vol. 33. – N 7. – P. 701–712.
- 18 Schwalm, C.R. et al. Global patterns of drought recovery// *Nature*. - 2017. - 548(7666). – P. 202-205. DOI: [10.1038/nature23021](https://doi.org/10.1038/nature23021)
- 19 Dennison et al. Large wildfire trends in the western United States, 1984–2011 / Dennison et al. // *Geophysical Research Letters*. – 2014. – N 41, – P. 8.
<https://doi.org/10.1002/2014GL059576>
20. Flannigan, M., Stocks B., Turetsky M., Wotton M. Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest // *Global Change Biology*. – 2009. – Vol. 15, – P. 3.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01660.x>
- 20 Харук, В.И., Пономарев Е.И Пространственно-временная горимость лиственничников Центральной Сибири // *Экология*. – 2017. – 6. – С. 413–419.
- 21 Groot der Brander L., Van Beukering P.J.H. et al. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units // *Ecosystem Services*. - 2013. – Vol. 1,1. – P. 50-61. DOI: [10.1016/j.ecoser.2012.07.005](https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.07.005)
- 22 Bartalev, S. A., Bartalev S. A.; Stytsenko F. V.; Egorov V. A.; Loupian E. A. Satellite assessment of fire-caused forest mortality in Russia // *Forestry (Lesovedenie)*. – 2015 - N2. – P. 83–94. (in Russian).
- 23 Ponomarev, E.I., Kharuk V.I., Ranson, J. K. Wildfires Dynamics in Siberian Larch Forests // *Forests*. – 2016.–Vol.7. –N. 125. – P. 1–9. DOI:[10.3390/f7060125](https://doi.org/10.3390/f7060125). 230
- 24 Goldammer, J.G. Wildfire Hazard and Risk Assessment / In book: *Words into Action Guidelines - National Disaster Risk Assessment Chapter: Wildfire Hazard and Risk Assessment* Publisher: UNISDR Editors: Robert Glasser
- 25 Харук В.И., Антамошкина О.А. // Воздействие сибирского шелкопряда на горимость лесных территорий. *Сибирский экологический журнал*. – 2017. – N 5. – С.647-654. DOI [10.15372/SEJ20170510](https://doi.org/10.15372/SEJ20170510) [Kharuk, V. I. Impact of Silkmoth Outbreak on Taiga Wildfires / Kharuk V. I., Antamoshkina O.A. // *Contemporary Problems of Ecology*. – 2017. - 10, 5. - P. 556–562. DOI: [10.1134/S1995425517050055](https://doi.org/10.1134/S1995425517050055).

- 26 WMO Greenhouse gas bulletin. – 2019 – N. 15.
- 27 Национальный доклад РФ о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2010 гг. М., 2012
29. McGuire, A. D. Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change / A. D. McGuire, L. G. Anderson, T. R. Christensen et al. // *Ecological Monographs*. – 2009. –V. 79. – N 4. – P. 523–555.
30. Dolman, A. J., A. Shvidenko, D. Schepaschenko et al. An estimate of the terrestrial carbon budget of Russia using inventory-based, eddy covariance and inversion methods // *Biogeosciences*. – 2012. –V. 9. – P. 5323–5340.
31. Sherwood, O., Schwietzke, S., Arling, V. & Etiope, G. Global Inventory of Fossil and Non-fossil Methane $\delta^{13}\text{C}$ Source Signature Measurements for Improved Atmospheric Modeling. 2016. <http://doi.org/10.15138/G37P4D>.
32. Levin, I., Hammer, S., Kromer, B., and Meinhardt, F.: Radiocarbon observations in atmospheric CO₂: Determining fossil fuel CO₂ over Europe using Jungfraujoch observations as background, *Sci. Total Environ.*, – 2008. N 391. – P. 211–216.
33. Wenger A., Pugsley K., O’Doherty S., Matt Rigby, Alistair J. Manning, Mark F. Lunt, White E.D. Atmospheric radiocarbon measurements to quantify CO₂ emissions in the UK from 2014 to 2015 // *Atmos. Chem. Phys.*– 2019 – Vol. 19. –P. 14057–14070, <https://doi.org/10.5194/acp-19-14057-2019>
34. Knoblauch C., Beer C., Sosnin A., Wagner D., Pfeiffer EM. Predicting long-term carbon mineralization and trace gas production from thawing permafrost of Northeast Siberia // *Global Change Biology*. – 2013. – Vol. 19(4). – P. 1160-72.
35. Schuur E.A.G., Vogel J.G., Crummer K.G., Lee H., Sickman J.O., Osterkamp T.E. The effect of permafrost thaw on old carbon release and net carbon exchange from tundra // *Nature*. – 2009. – Vol. 459. –P. 556–559.
36. Schuur E.A.G., McGuire A.D., Grosse G., Harden J.W., Hayes D.J., Hugelius G., Koven C.D., Kuhry P. Climate change and the permafrost carbon feedback // *Nature*. – 2015. – Vol. 520. – P. 171–179.
37. Foth D. *Fundamentals of Soil Science*, 8th Edition.–1990. P.–384.
38. Parfitt R.L., Giltrap D.J., Whitton J.S. Contribution of organic matter and clay minerals to the cation exchange capacity of soils // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. –1995. – Vol. 26. – P. 9-10.
39. Muneer M., Oades, J.M. The role of Ca-organic interactions in soil aggregate stability .III. Mechanisms and models // *Australian Journal of Soil Research*. –1989. – Vol. 27. – P. 411-423.
40. Bache, B.W. The role of calcium in buffering soils // *Plant, Cell and Environment*. – 1984). – Vol. 7. – P. 391-395.
41. Martin, J.P., Ervin, J.O., Shepard, S.J. Decomposition of the iron, aluminium, zinc, and copper salts or complexes of some microbial and plant polysaccharides in soils // *Soil Science Society of America Proceedings*. –1966. – Vol. 30. – P. 196-200.
42. Martin, J.P., Ervin, J.O., Richards, S.J. Decomposition and binding action of some mannose containing microbial polysaccharides and their Fe, Al, Cu, and Zn complexes // *Soil Science*. –1972. – Vol. 113. – P. 322-327.
43. Baldock, J.A., Skjemstad, J.O. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack // *Organic Geochemistry*. –2000. – Vol. 31. – P. 697-710.

44. Щеглов К.А., Липатов Д.Н., Владыченский А.С. Кислотно-основные свойства темно-серой лесной почвы под разными лесными насаждениями и в агроценозе // Вестн. Моск. Ун-та.–2008. –Сер. 17. Почвоведение. –№ 2. –С. 37-46.
45. Wang, Q., Li, Y., Klassen, W. Determination of Cation Exchange Capacity on Low to Highly Calcareous Soils // Communications in Soil Science and Plant Analysis. –2005. – Vol.36. – P. 1479–1498.
46. Ваганов, Е. А., Шашкин А.В. Рост и структура годичных колец хвойных. Новосибирск: Наука, 2000. – 232 с.
47. Vaganov E. A, Hughes M.K, Shashkin A. V. Growth dynamics of conifer tree rings: images of past and future environments. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2006 – p. 354.
48. Schweingruber F.H., Börner A., Schulze E.-D. 2006. Atlas of Woody Plant Stems (Evolution, Structure, and Environmental Modifications). – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, – 230 p.
49. Бенькова, В.Е., Шашкин А.В, Наурзбаев М.М, Прокушкин А.С., Симанько В.В. Значение микроэкологических условий для роста лиственницы Гмелина в экотоне верхней границы леса на полуострове Таймыр. // Лесоведение. – 2012. – №4. – С. 73-84.
50. Бенькова В.Е., О.А. Зырянова, А.В. Шашкин, А.В. Бенькова, Д.С. Собачкин, В.В. Симанько, В.И. Зырянов. Эффект высокой пространственной мозаичности мохово-лишайникового покрова в радиальном росте лиственницы Гмелина (Центральная Эвенкия) // Лесоведение. – 2014. – № 4. – С. 41-49.
51. Bigler C., Bräker O. U., Bugmann H., Dobbertin M., Rigling A. Drought as an inciting mortality factor in Scots pine stands of the Valais, Switzerland // Ecosystems. –2006. –V. 9.–Iss. 3. – P. 330–343.
52. Колесников Б.П. Кедровые леса Дальнего Востока. М.-Л: Изд-во АН СССР, 1956. - 262 с.
53. Мкртчян А.С. Автоматизированное выделение ландшафтных единиц путем классификации рельефа с применением ГИС // Ландшафтное планирование. Общие основания. Методология. Технология: тр. Междунар. школы-конф. М.: Географический факультет МГУ, 2006. – С. 203 – 208.
54. Richards, J.A., Xiuping, J., 2005. Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. Birkhäuser, 439 p.
55. Bock M., Xofis P., Mitchley J., Rossner G., Wissen M. Object-oriented methods for habitat mapping at multiple scales – Case studies from Northern Germany and Wye Downs, UK. Journal for Nature Conservation.– 2005 – V. 13, –P. 75-89. DOI: 10.1016/j.jnc.2004.12.002
56. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России // Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН). Москва, 2016, – 208 с.
57. Vidal-Macua J., Zabata A., Ninyerola M. and Pons X. Developing spatially and thematically detailed backdated maps for land cover studies. International Journal of Digital Earth, 2016. Doi: 10.1080/17538947.2016.1213320.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПЕРЕЧЕНЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМАТИКЕ
ПРОЕКТА В 2019 Г.

1. *E.A. Babushkina, L.V. Belokopytova, D.F. Zhirnova, E.A. Vaganov* Siberian spruce tree ring anatomy: imprint of development processes and their high-temporal environmental regulation // *Dendrochronologia* (2019) 53: 114-124; doi: 10.1016/j.dendro.2018.12.003, <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.12.003> (Scopus, WoS)
2. *E.A. Babushkina, D.F. Zhirnova, L.V. Belokopytova, I.I. Tychkov, E.A. Vaganov, K.V. Krutovsky* Response of Four Tree Species to Changing Climate in a Moisture-Limited Area of South Siberia // *Forests* (2019) 10 (11): Article number 999; doi: 10.3390/f10110999, <https://www.mdpi.com/1999-4907/10/11/999> (Scopus, WoS)
3. *U. Büntgen, P.J. Krusic, A. Pierrat, D.A. Coomes, J. Esper, V.S. Mygland, A.V. Kirilyanov, J.J. Camarero, A. Crivellaro, C. Körner* Limited capacity of tree growth to mitigate the global greenhouse effect under predicted warming // *Nature Communications* (2019) 10: Article number 2171; doi: 10.1038/s41467-019-10174-4, <https://www.nature.com/articles/s41467-019-10174-4> (Scopus, WoS)
4. *M. Cailleret, V.I. Kharuk, Martínez-Vilalta* Early-Warning Signals of Individual Tree Mortality Based on Annual Radial Growth // *Frontiers in Plant Science* (2019) 9: Article number 1964; doi: 10.3389/fpls.2018.01964, <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01964>. (Scopus, WoS)
5. *O.V. Churakova, M.V. Fonti, M. Saurer, S. Guillet, C. Corona, P. Fonti, V.S. Mygland, A.V. Kirilyanov, O.V. Naumova, D.V. Ovchinnikov, A. Shashkin, I. Panyushkina, U. Büntgen, M.K. Hughes, E.A. Vaganov, R.T.W. Siegwolf, M. Stoffel* Siberian tree-ring and stable isotope proxies as indicators of temperature and moisture changes after major stratospheric volcanic eruptions // *Climate of the Past* (2019) 15, 685-700; doi: 10.5194/cp-15-685-2019, <https://doi.org/10.5194/cp-15-685-2019> (Scopus, WoS).
6. *E.V. Fedotova* Estimation of forest cover restoration damaged by Siberian silkmoth using remote sensing data and maps // *E3S Web of Conferences, Regional Problems of Earth Remote Sensing (RPERS 2018)* (2019) 75: Article Number 02005; <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20197502005> (WoS, Scopus)
7. *V.I. Kharuk, K.J. Ranson, I.A. Petrov, M.L. Dvinskaya, S.T. Im, Golyukov A.S.* Larch (*Larix dahurica* Turcz) growth response to climate change in the Siberian permafrost zone // *Regional Environmental Change* (2019) 19: 233–243; <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1401-z> (Scopus, WoS)
8. *A.A. Knorre, A.V. Kirilyanov, A.S. Prokushkin, P.J. Krusic, U. Büntgen* Tree ring-based reconstruction of the long-term influence of wildfires on permafrost active layer dynamics in Central Siberia // *Science of The Total Environment* (2019) 652: 314-319. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.124> (Scopus, WoS)
9. *Y.L. Liu, T.D. Ge, J. Ye, S.L. Liu, O. Shibistova, P. Wang, J.K. Wang, Y. Li, Guggenberger G., Y. Kuzyakov, J.S. Wu* Initial utilization of rhizodeposits with rice growth in paddy soils: Rhizosphere and N fertilization effects // *Geoderma* (2019) 338: 30-39; doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.11.040>. (Scopus, WoS)
10. *O.V. Masyagina, Evgrafova S.Yu., T.N. Bugaenko, V.V. Kholodilova, L.V. Krivobokov, M.A. Korets, D. Wagner* Permafrost landslides promote soil CO₂ emission and

hinder C accumulation // *Science of the Total Environment* (2019) 657: 351–364; doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.468 (Scopus, WoS)

11. *L. Orgogozo, A.S. Prokushkin, O.S. Pokrovsky, C. Grenier, M. Quintard, J. Viers, S. Audry* Water and energy transfer modeling in a permafrost-dominated, forested catchment of Central Siberia: The key role of rooting depth // *Permafrost and Periglacial Processes* (2019) 30: 75–89; <https://doi.org/10.1002/ppp.1995>, <https://doi.org/10.1002/ppp.1995> (Scopus, WoS)

12. *A. Panov, A. Prokushkin, M. Korets, N. Sidenko, M. Heimann* Continuous measurements of carbon dioxide and methane mole fractions in the Arctic zone of Central Siberia: an introduction to a new coastal site Dikson // 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019 (2019) 19 (book number 5.2): 249–262 doi: 10.5593/sgem2019/5.2/S20.032 (Scopus)

13. *E. Parfenova, N. Tchebakova, A. Soja* Assessing landscape potential for human sustainability and ‘attractiveness’ across Asian Russia in a warmer 21st century // *Environmental Research Letters* (2019) 14: Article number 065004
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab10a8> (Scopus, WoS)

14. *E.I. Ponomarev, T.V. Ponomareva, A.S. Prokushkin* Intraseasonal Dynamics of River Discharge and Burned Forest Areas in Siberia // *Water* (2019): 11: Article number 1146; doi:10.3390/w11061146 (Scopus, WoS)

15. *A. Prokushkin, M.A. Korets, A.V. Panov, M.P. Prokushkina, I.V. Tokareva, S.N. Vorobyev, O.S. Pokrovsky* Carbon and nutrients in the Yenisei River tributaries draining the Western Siberia Peatlands // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* (2019) 232: Article number 012010; doi:10.1088/1755-1315/232/1/012010 (Scopus)

16. *E.G. Shvetsov, E.A. Kukavskaya, L.V. Buryak, K. Barrett* Assessment of post-fire vegetation recovery in Southern Siberia using remote sensing observations // *Environmental Research Letters* (2019) 14: Article number 055001; <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab083d> (Scopus, WoS)

17. *B.S. Steidinger et al.* (более 200 авторов, включая *E. Parfenova, N. Tchebakova*) Climatic controls of decomposition drive the global biogeography of forest-tree symbioses // *Nature* (2019) 569(7756): 404–408; <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1128-0> (Scopus, WoS)

18. *M. Thurner, C. Beer, T. Crowther, D. Falster, S. Manzoni, A. Prokushkin, E.-D. Schulze* Sapwood biomass carbon in northern boreal and temperate Forests // *Global Ecology and Biogeography* (2019) 28: 640–660; <https://doi.org/10.1111/geb.12883>(WoS, Scopus)

19. *J. Urban, A.V. Rubtsov, Urban A.V., A.V. Shashkin, Benkova V.E.* Canopy transpiration of a *Larix sibirica* and *Pinus sylvestris* forest in Central Siberia // *Agricultural and Forest Meteorology*. (2019) 271: 64–72; <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.02.038> (WoS, Scopus)

20. *A. Wiedensohler, N. Ma, W. Birmili, J. Heintzenberg, F. Ditas, M.O. Andreae, A. Panov* Infrequent new particle formation over the remote boreal forest of Siberia // *Atmospheric Environment* (2019) 200: 167–169; doi: 10.1016/j.atmosenv.2018.12.013 (WoS, Scopus)

21. *D.F. Zhirnova, E.A. Babushkina, L.V. Belokopytova, D.O. Yurin, E.A. Vaganov* Sunshine as culprit: It induces early spring physiological drought in dark coniferous (*Pinus*

sibirica and *Abies sibirica*) alpine forest // Forest Ecology and Management (2019) 449: Article number 117458; doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117458(WoS, Scopus)

22. **D.F. Zhirnova, L.V. Belokopytova, A.E. Barabantsova, E.A. Babushkina, E.A. Vaganov** What prevails in climatic response of *Pinus sylvestris* in-between its range limits in mountains: slope aspect or elevation? // International journal of biometeorology (First Online: 05 November 2019) <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01811-0> (WoS, Scopus)

23. **Е.В. Калинина, А.А. Кнорре, М.В. Фонти, Е.А. Ваганов** Сезонное формирование годичных колец лиственницы сибирской и сосны обыкновенной в зоне южной тайги Средней Сибири // Экология (2019) 3: 182-188. [**E.V. Kalinina, A.A. Knorre, M.V. Fonti, E.A. Vaganov** Seasonal formation of tree rings in Siberian Larch and Scots Pine in the Southern taiga of Central Siberia. Russian Journal of Ecology (2019) 50(3): 227-233. doi: 10.1134/S1067413619030068 (WoS, Scopus)]

24. **М.И. Макаров, М.С. Кадулин, С.Р. Турчин, Т.И. Малышева, А.А. Аксенова, В.Г. Онипченко, О.В. Меньяйл.** Влияние *Vaccinium vitis-idaea* на свойства горно-луговой почвы альпийской лишайниковой пустоши // Экология (2019) 4: 270-275. [**M.I. Makarov, M.S. Kadulin, S.R., Turchin, T.I. Malysheva, A.A. Aksenova, V.G. Onipchenko, Menyailo O.V.** The effect of *Vaccinium vitis-idaea* on properties of mountain-meadow soil under alpine lichen heath. // Russian Journal of Ecology (2019) 50(4): 337-342 doi: 10.1134/S1067413619040118] (Scopus, WoS)

25. **М.И. Макаров, Т.И. Малышева, О.В. Меньяило** Изотопный состав азота и трансформация азот содержащих соединений в горно-луговых альпийских почвах // Почвоведение (2019) 9: 1039-1048 [**M.I. Makarov, T.I. Malysheva, O.V. Menyailo** Isotopic composition of nitrogen and transformation of nitrogen compounds in meadow-alpine soils. // Eurasian Soil Science (2019) 52(9): 1028-1037; doi: 10.1134/S1064229319090059](Scopus, WoS)

26. **А.В. Урбан, А.С. Прокушкин, М.А. Корец, А.В. Панов, К. Гербиг, М. Хайманн** Влияние подстилающей поверхности на концентрации парниковых газов в атмосфере Центральной Сибири // География и природные ресурсы (2019) 3: 32–40 [**A.V. Urban, A.S. Prokushkin, M.A. Korets, A.V. Panov, C. Gerbig, M. Heimann** Influence of the Underlying Surface on Greenhouse Gas Concentrations in the Atmosphere Over Central Siberia // Geography and Natural Resources (2019) 40(3): 221-229; doi: 10.1134/S1875372819030041] (WoS, Scopus)

27. **В.И. Харук, А.С. Шушпанов, И.А. Петров, Д.А. Демидко, С.Т. Им, А.А. Кнорре** Усыхание *Abies sibirica* Ledeb. в горных лесах Восточного Саяна // Сибирский экологический журнал (2019) 4: 369–382; doi: 10.15372/SEJ20190401 [**V.I. Kharuk, A.S. Shushpanov, I.A. Petrov, Demidko D.A., S.T. Im, A.A. Knorre** Fir (*Abies sibirica* Ledeb.) Mortality in Mountain Forests of the Eastern Sayan Ridge, Siberia // Contemporary Problems of Ecology (2019) 12(4): 299–309; doi: 10.1134/S199542551904005X] (WoS, Scopus)

28. **E.I. Ponomarev E.I., T.V. Ponomareva, O.V. Masyagina, Shvetsov E.G., O.I. Ponomarev, K.V. Krasnoshchekov, A.V. Dergunov** Post-fire effect modeling for the permafrost zone in Central Siberia on the basis of remote sensing data // Proceedings (2019) 18(1): doi: 10.3390/ECRS-3-06202, <https://doi.org/10.3390/ECRS-3-06202> (Scopus)

29. **Sorokin, V Podoprigora, E. Ponomarev** Forest dielectric characteristics for navigation satellites signals in L 1 range // E3S Web of Conferences, Regional Problems of Earth

Remote Sensing (RPERS 2018) (2019) 75: Article Number 01011; doi: 10.1051/e3sconf/20197501011 (Scopus, WoS)

30. *А.В. Лапко, В.А. Лапко, С.Т. Им, В.П. Тубольцев, В.Л. Авдеенок* Непараметрический алгоритм выделения классов, соответствующих одномодальным фрагментам плотности вероятности многомерных случайных величин // *Автометрия* (2019) 55(3): 22-30; doi: 10.15372/AUT20190303. [A.V. Lapko, V.A. Lapko, S.T. Im, V.P. Tuboltsev, V.A. Avdeenok Nonparametric Algorithm of Identification of Classes Corresponding to Single-mode Fragments of the Probability Density of Multidimensional Random Variables // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* (2019) 55(3): 451–456; doi: 10.3103/S8756699019030038]. (WoS, Scopus)

31. *Е.И. Пономарев К.Ю. Литвинцев, Е.Г. Швецов* и др. Аппроксимация высокотемпературной зоны пожара на основе данных TERRA/MODIS в задаче субпиксельного анализа // *Геофизические процессы и биосфера* (2019) 18(2): 97-105 [E.I.Ponomarev, K.Yu. Litvintsev, E.G. Shvetsov et al. Approximation of a high-temperature fire zone in the sub-pixel processing of TERRA/MODIS data // *Geofizicheskie protsessy i biosfera* (2019) 18(2): 97-105; doi: 10.21455/GPB2019.2-8 (Scopus)

Статьи, индексируемые в РИНЦ

32. *І.А. Petrov, А.С. Shushpanov, А.С. Golyukov, V.І. Kharuk* *Pinus sibirica* du Tour response to climate change in the forests of the Kuznetsk Alatau mountains // *Сибирский лесной журнал*, 2019. № 5. 43-53. DOI: 10.15372/SJFS20190506 <http://xn--80abmehbaibgnewcmzjeef0c.xn--p1ai/upload/iblock/e3d/e3de766f76d14baddcbf00394d2bf30c.pdf> (РИНЦ, ВАК)

33. *А.В. Бенькова, А.В. Рубцов, В.Е. Бенькова, А.В. Шашкин.* Сезонная динамика сокодвижения у деревьев *Larix sibirica* в Красноярской лесостепи // *Журнал СФУ, сер. биология* (2019) 1: 32-47; doi: 10.17516/1997-1389-0071(РИНЦ, ВАК)

34. *І.Т. Garipov, R.R. Khaydarov, O.U. Gapurova, R.A. Khaydarov, M.L. Firdaus, I.L. Efimova, S.Yu. Evgrafova* Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobial prophylaxis // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология.* (2019) 12(3): 266-27; doi: 10.17516/19971389-0301, <https://elibrary.ru/item.asp?id=40871764> (РИНЦ)

Монографии:

Пономарев Е.И., Харук В.И., Швецов Е.Г. Мониторинг природных пожаров в Сибири: динамика горимости в современном климате, пространственно-временные закономерности, характеристики и прогнозы. Красноярск: СФУ, 2019. – 300 с. ISBN: 978-5-7638-4111-4 (выходит в декабре 2019).

Эконометрика в примерах и задачах. 2-е изд., испр. и доп./ И.И. Тычков, В.В. Шишов, **Г.Б. Кофман**, М.И. Попкова, И.Н. Коюпченко. Сибирский Федеральный Университет: Красноярск, 2019. – 202 с.

Главы монографий:

Volokitina A.V., Sofronova T.M., Korets M.A. Improvement of Forest Danger Rating in Russia // Book «Advances in Forest Fire Research 2018», Edited by Domingos Xavier Viegas, ADAI/CEIF, University of Coimbra, Portugal, 2018, Chapter 3, Pp. 514-521. https://doi.org/10.14195/978-989-26-16-506_56

Volokitina A.V., Sofronova T.M., Korets M.A. Vegetation fire management in strict nature reserves // Book «Advances in Forest Fire Research 2018», Edited by Domingos Xavier Viegas, ADAI/CEIF, University of Coimbra, Portugal, 2018, Chapter 7, Pp. 1320-1322. https://doi.org/10.14195/978-989-26-16-506_168

Guggenberger, G., Bischoff, N., Shibistova, O., Müller, C., Rolinski, S., Puzanov, A., Prishchepov, A.V., Mikutta, R. Interactive effects of land use and organic carbon storage in Western Siberian steppe soils. // Book Kulunda: Climate Smart Agriculture. South Siberian Agro-steppe as Pioneer Region for Sustainable Land Use. Edited by Manfred Fröhlich. 2019. Springer, Chapter 13, pp. 183-199. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-15927-6>. ISSN – 2524-5155

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ В СООТВЕТСТВИИ С ПЛАНОМ РАБОТ ПО ПРОГРАММЕ

| | |
|---|---|
| <p>Номер проекта в ИСГЗ ФАНО VI.52.2.3.</p> <p>ГЗ № 0356-2019-0009</p> <p>Динамика лесов Сибири в меняющемся климате: мониторинг жизненного состояния, продуктивности и ареалов основных лесообразующих видов древесных растений.</p> <p>Регистрационный номер НИОКТР АААА-А17-117101940016-3</p> | <p>Разработана карта биомассы заболони для северного полушария. Показано, что общая биомасса заболони составила $12,87 \pm 6,56$ Пг углерода в бореальной зоне (средняя плотность углерода: $1,13 \pm 0,58$ кгС м⁻²) и $15,80 \pm 9,10$ ПгС в умеренных лесах ($2,03 \pm 1,17$ кгС м⁻²). Значительные пространственные различия в пропорциях биомассы заболони к общей стволовой древесине показывают необходимость учитывать функционально более важную заболонь, а не всю стволовую биомассу в глобальных исследованиях круговорота углерода и воды.</p> <p>Анализ количественных характеристик природных источников парниковых газов (СО₂ и СН₄) на территории Средней Сибири показал, что, в отличие от почвенного дыхания, эмиссионные потоки с водной поверхности водотоков коррелируют с концентрацией растворенного органического вещества ($r = 0,68$, $p < 0,05$). Дыхание водных систем лимитировано доступностью субстрата (органического вещества), тогда как для почвенной микробиоты большую роль играют гидротермический режим и доступность элементов минерального питания.</p> <p>Для идентификации источников происхождения парниковых газов в арктической атмосфере проведен анализ сезонного распределения направлений ветров и соответствующих им диапазонов средних значений концентрации диоксида углерода и метана (г.п. Диксон, Таймырский АО).</p> <p>Исследования постсолифлюкционных участков различной степени давности в криогенных лиственничниках Центральной Эвенкии показали, что ускоренная деградация многолетней мерзлоты вследствие оползней при современном потеплении климата препятствует накоплению в почве органического вещества.</p> <p>Получены характеристики потепления климата в Сибири, рассчитанные по ансамблю 20 климатических моделей и двум сценариям изменения климата RCP 2.6 и RCP 8.5 (умеренное и сильное потепление). Средние значения температуры $3,4^{\circ}\text{C}$ (RCP 2.6)– $9,1^{\circ}\text{C}$ (RCP 8.5) зимой; $1,9^{\circ}\text{C}$ (RCP 2.6) – $5,7^{\circ}\text{C}$ (RCP 8.5) летом; годовое количество осадков — 60 мм (RCP 2.6) – 140 мм (RCP 8.5).</p> <p>Определено содержание обменных катионов (Ca, K, Mg, Na, Al, Fe, Mn) в почвах лесных экосистем на ключевых участках в южной, средней и северной тайге. На основе этих данных была рассчитана емкость катионного обмена и оценена степень насыщенности основаниями почв исследуемых регионов.</p> <p>В полевом инкубационном эксперименте с захороненной почвой мерзлотной экосистемы Восточной Сибири определена суммарная величина эмиссии парниковых газов (СО₂, СН₄) за четыре вегетационных периода. Показано, что захороненная почва, вовлеченная в криотурбационные процессы, выделяет в 2,7 раза больше СО₂, чем почва, оттаивающая при береговой эрозии. В то же время, эмиссия метана при береговой эрозии в 1,6 раза превышает таковую в криотурбированных почвах.</p> |
|---|---|

Выявлен многолетний тренд горимости лесов с привязкой к основным лесообразующим породам древостоев, который описывается логарифмической функцией ($R^2 > 0,92$) и соответствующими коэффициентами (k), определяющими многолетнюю динамику площадей пожаров в рассматриваемых древостоях. Прогностические оценки в условиях сохранения современных пожарных режимов в Сибири представлены до 2030 г.

Выявлено, что интенсивный радиальный рост деревьев в молодом возрасте соответствует меньшей продолжительностью жизни (корреляция значима), то есть, при укороченном времени консервации поглощенного атмосферного углерода лесными экосистемами. При потеплении климата, обуславливающим увеличение темпов роста деревьев и сокращение их продолжительности жизни, должно снизиться накопление углерода лесами.

Ксилотомический анализ выявил специфические для роста на многолетней мерзлоте модификации в анатомическом строении ксилемы у усыхающих деревьев в суховершинных криогенных лиственничниках, появившиеся в конце 1980-х (с начала заметного регионального потепления). Они подтверждают наличие острого водного дефицита; который у более «чувствительных» к нему деревьев является причиной появления суховершинности.

Разработана методика комбинированного анализа данных дистанционного зондирования, цифровой модели рельефа и материалов наземных обследований, позволяющая оперативно модифицировать картографические модели в результате обновления исходной информации, что особенно актуально для обширных таежных регионов Сибири.

Руководитель темы:
главный научный сотрудник,
д-р биол. наук, академик РАН Е.А. Ваганов