

*На правах рукописи*

Мамкин Вадим Витальевич

**ВЛИЯНИЕ ВЫРУБКИ НА КЛИМАТОРЕГУЛИРУЮЩИЕ ФУНКЦИИ  
ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ ЮГО-ЗАПАДА ВАЛДАЙСКОЙ  
ВОЗВЫШЕННОСТИ**

03.02.08 – экология  
(биологические науки)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
биологических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова Российской академии наук», в Лаборатории биогеоценологии им. В.Н. Сукачева

**Научный руководитель:** **Курбатова Юлия Александровна**, кандидат биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Лаборатории биогеоценологии им. В.Н. Сукачева ФГБУН Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН

**Официальные оппоненты:** **Загирова Светлана Витальевна**, доктор биологических наук, старший научный сотрудник, врио зав. отделом лесобиологических проблем Севера Института биологии Коми НЦ УрО РАН — обособленного подразделения ФГБУН ФИЦ «Коми научный центр УрО РАН», заведующая кафедрой биологии Института естественных наук ФГБОУ ВПО «Сыктывкарский Государственный Университет»

**Курганова Ирина Николаевна**, доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН — обособленного подразделения ФГБУН ФИЦ «Пушинский научный центр биологических исследований РАН»

**Ведущая организация:** Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН — обособленное подразделение ФГБУН ФИЦ «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (г. Красноярск)

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ года в \_\_\_ час. \_\_\_ мин. на заседании диссертационного совета Д 002.213.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова Российской академии наук» по адресу: 119071, г. Москва, Ленинский проспект, д. 33. Тел./факс: +7(495)952-35-84, e-mail: [admin@sevin.ru](mailto:admin@sevin.ru)

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке Отделения биологических наук Российской академии наук по адресу: 119071, г. Москва, Ленинский проспект, д. 33; на сайте ИПЭЭ РАН по адресу: [www.sev-in.ru](http://www.sev-in.ru) и на сайте Высшей аттестационной комиссии по адресу [vak.minobrnauki.gov.ru](http://vak.minobrnauki.gov.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ г.

Ученый секретарь

диссертационного совета, к.б.н.

Елена Александровна Кацман

## Общая характеристика работы

**Актуальность и степень разработанности темы исследования.** Биогеофизические и биогеохимические процессы, определяющие обмен энергией и веществом наземных экосистем с атмосферой, в последние годы рассматриваются в контексте оценки климаторегулирующих функций экосистем в условиях глобальных климатических изменений и роста антропогенных нагрузок (de Groot et al., 2002; Chapin et al., 2008; IPCC, 2014). Актуальность исследований воздействия антропогенных нарушений на климаторегулирующие функции вызвана, во-первых, необходимостью учёта трансформации процессов энерго- и массообмена в результате антропогенного нарушения при прогнозировании изменений климата и состояния окружающей среды, а во-вторых, недостатком знаний о способности природных экосистем к восстановлению своих функций после нарушения, т.к. их отклик на внешние воздействия, как правило, носит нелинейный характер (IPCC, 2018; King et al., 2018).

Взаимное влияние леса на климат и климата на лес в настоящее время очевидно для научного сообщества (Замолотчиков, Краев, 2016; Молчанов, 1961; Bonan, 2008; Green et al., 2017; IPCC, 2018). Занимая более 3.9 млрд га (около 30% поверхности суши на земном шаре), лесные экосистемы участвуют в преобразовании энергии, воды и углерода, оказывая существенное влияние на тепловой, водный и углеродный балансы атмосферы. В то же время более 80% лесов мира подвергались когда-либо природным или антропогенным нарушениям (Bjornlund, 2008). Площадь бореальных лесов составляет почти  $\frac{1}{4}$  (22%) общей площади лесов (Keenan et al., 2015). Благодаря низкой отражательной способности (альбедо) бореальные леса Северного полушария интенсивно преобразуют солнечную радиацию, контролируют суммарное испарение и являются преимущественно стоком атмосферного CO<sub>2</sub> (Bonan, 2008). Согласно результатам численного моделирования, суммарный эффект от вырубki бореальных лесов приводит к снижению средней глобальной температуры воздуха у поверхности земли (Bonan, 2008; IPCC, 2014; Snyder et al., 2004), однако региональные оценки воздействия вырубki леса на тепловой режим атмосферы не столь однозначны (Lejeune et al., 2018). Значительный разброс в оценках изменения

климаторегулирующих функций растительности, которые были получены на основе численного моделирования, сложность биологических процессов, влияющих на энерго- и массообмен лесных экосистем с атмосферой, и мозаичность растительного покрова обуславливают необходимость получения экспериментальных данных о потоках тепла и парниковых газов с учётом разнообразия экологических условий. Экспериментальные данные необходимы для верификации результатов численного моделирования, улучшения качества климатического прогноза и оценки экологических последствий климатических изменений.

Наблюдения, позволяющие оценить трансформацию биогеофизических и биогеохимических процессов в результате вырубки леса, носят крайне ограниченный характер. Для территории России исследования, направленные на оценку энерго- и массообмена антропогенно нарушенных экосистем с атмосферой на основе прямых экспериментальных измерений, остаются единичными (Кузнецов, 2017; Молчанов и др., 2017; Machimura et al., 2005; Mamkin et al., 2019 и др.). Большая часть исследований на вырубках была сфокусирована на изучении углеродного баланса нарушенных экосистем и выполнена на территории США и Канады в соответствующих региону экологических условиях, в связи с чем затруднительно сделать вывод о репрезентативности результатов наблюдений на территории Северной Америки применительно к бореальным лесам других регионов мира, в том числе и к лесам европейской территории России (ЕТР).

**Цели и задачи исследования.** Цель исследования состояла в оценке трансформации климаторегулирующих функций лесных экосистем в результате сплошной вырубки в условиях южной тайги ЕТР.

Для достижения цели исследования были поставлены и последовательно решены следующие задачи:

1. Организация и поддержание одновременных наблюдений за экосистемными потоками тепла, влаги и диоксида углерода, а также метеорологическими параметрами на сплошной вырубке первых трёх лет зарастания и в субклимаксом неморальном ельнике, расположенных в одинаковых

климато-эдафических и орографических условиях и являющихся стадиями одного сукцессионного ряда.

2. Исследование влияния сплошной вырубki на преобразование потоков солнечной радиации.
3. Оценка трансформации биогеофизических процессов (обмен потоками тепла и влаги экосистемы с атмосферой) после сплошной вырубki леса.
4. Выявление специфики биогеохимических процессов (депонирования и эмиссии диоксида углерода) на сплошной вырубке первых лет зарастания.
5. Исследование влияния сплошной вырубki на отклик процессов энерго- и массообмена экосистемы с атмосферой в ответ на изменчивость метеорологических переменных.

**Научная новизна исследования.** Впервые для подзоны южной тайги ЕТР на основе прямых наблюдений, проводимых по единой методологии в одинаковых климато-эдафических условиях, были получены одновременные количественные оценки экосистемных потоков  $H_2O$  и  $CO_2$ , составляющих радиационного и теплового балансов на сплошной вырубке первых трёх лет зарастания и в неморальном ельнике, что позволило впервые для региона выявить закономерности трансформации климаторегулирующих функций в результате вырубki.

В том числе впервые показано, что сплошная вырубка в южно-таёжной подзоне ЕТР приводит к уменьшению энергообеспеченности экосистемы, снижению турбулентного теплообмена, суммарного испарения и к увеличению эмиссии  $CO_2$  в атмосферу. В то же время вырубка не оказывает влияния на структуру расходной части теплового баланса и не приводит к изменению абиотических факторов, определяющих суммарное испарение.

Также впервые для региона получены оценки энерго- и газообмена  $CO_2$ ,  $H_2O$  зарастающей сплошной вырубki в суточной, сезонной и межгодовой динамике на экосистемном уровне осреднения, которые характеризуют специфику биогеофизических и биогеохимических процессов экосистемы вырубki как особого типа деятельной поверхности.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Полученные в ходе исследования результаты позволили расширить существующие представления о влиянии вырубки на климаторегулирующие функции лесных экосистем в условиях современного климата. Результаты работы могут быть использованы для уточнения параметров климатических и экологических моделей, при расчётах региональных потоков парниковых газов, а также могут быть востребованы при разработке экологической политики в рамках выполнения международных обязательств по предотвращению глобальных климатических изменений.

Данные полевого эксперимента на сплошной вырубке включены в открытую международную базу данных эколого-климатического мониторинга European Fluxes Database Cluster (<http://www.europe-fluxdata.eu/>).

**Методология и методы исследования.** Исследование основано на сравнении данных одновременных экспериментальных наблюдений за экосистемными потоками тепла  $H_2O$  и  $CO_2$  на основе методики турбулентных пульсаций (eddy covariance) (Aubinet et al, 2012; Burba et al., 2013) в двух экосистемах, расположенных в сходных климатических, эдафических и орографических условиях: в ненарушенном (условно) неморальном ельнике и на сплошной вырубке первых трёх лет зарастания. Организация полевого эксперимента, обработка и интерпретация результатов были выполнены согласно методическим рекомендациям международной сети эколого-климатических станций (сеть FLUXNET).

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Сплошная вырубка неморального ельника в подзоне южной тайги ЕТР приводит к уменьшению радиационного баланса, суммарного испарения и турбулентного теплообмена лесной экосистемы с атмосферой.
2. Сплошная вырубка неморального ельника в подзоне южной тайги ЕТР не приводит к изменению структуры теплового баланса за вегетационный период: затраты тепла на суммарное испарение превышают поток явного тепла, что характерно для ненарушенных лесных экосистем бореальной зоны.

3. Сплошная вырубка в подзоне южной тайги ЕТР является устойчивым источником  $\text{CO}_2$  для атмосферы в течение первых трёх лет зарастания на уровне сумм чистого экосистемного обмена за вегетационный период, в то время как ненарушенные зрелые еловые экосистемы бореальной зоны могут быть как стоком, так и источником  $\text{CO}_2$  в зависимости от погодных условий вегетационного периода.

**Степень достоверности и апробация результатов.** В работе использованы стандартизированные методы измерения, обработки и интерпретации данных о потоках энергии и вещества между наземными экосистемами и атмосферой. Результаты исследования были представлены на Всероссийской конференции «Стационарные экологические исследования: опыт, цели, методология, проблемы организации» (пос. Заповедный, Тверская обл., 2016 г.), на Всероссийской конференции с международным участием «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития» (Москва, 2017 г.), на Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Теория и практика современных географических исследований» в рамках XIII Большого географического фестиваля (БГФ-2017) (Санкт-Петербург, 2017 г.), на Генеральной ассамблее Европейского союза наук о земле (EGU) (Вена, Австрия, 2017 и 2018 гг.), на Всероссийской конференции с международным участием «Вклад заповедной системы в сохранение биоразнообразия и устойчивое развитие» (пос. Заповедный, Тверская обл., 2017 г.), на Всероссийской конференции с международным участием «Бореальные леса: состояние, динамика, экосистемные услуги» (Петрозаводск, респ. Карелия, 2017 г.), на 3-й международной научной конференции РЕЕХ (Москва, 2017 г.), на конференции японского общества наук о Земле (JpGU) (Тиба, Япония, 2018 и 2019 гг.), на тематической конференции международного географического союза, посвящённой 100-летию Института Географии РАН «Practical Geography and XXI Century Challenges» (Москва, 2018 г.), на Всероссийской конференции с международным участием «Научные основы устойчивого управления лесами» (Москва, 2018 г.), на Осенней конференции американского геофизического союза (AGU) посвящённой 100-летию AGU (Вашингтон, США, 2018 г.), на

Всероссийской конференции с международным участием «Лесные экосистемы бореальной зоны: биоразнообразие, биоэкономика, экологические риски» (Красноярск, 2019 г.), на Второй международной конференции «Летопись природы: фенология, отклики биоты на изменение климата» (онлайн-конференция, пос. Заповедный, Тверская обл., 2020 г.), на международной научной конференции общеевропейской объединённой системы мониторинга за углекислым газом (ICOS) (онлайн-конференция, Утрехт, Нидерланды, 2020 г.).

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 7 статьях рецензируемых научных журналов, из которых 6 относятся к перечню изданий, рекомендованных ВАК, 5 индексируются в WoS Core Collection, а также представлены в 1 коллективной монографии и в 18 публикациях в прочих изданиях, включая материалы международных и всероссийских конференций.

**Личный вклад автора.** Соискателем были лично организованы трёхлетние экспериментальные наблюдения на сплошной вырубке, включая работы по комплектации и инсталляции оборудования, периодический контроль работы приборной базы и качества результатов наблюдений, проведены обработка и интерпретация экспериментальных данных в рамках задач диссертационного исследования.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения. Текст работы содержит 209 страниц, 74 рисунка и 18 таблиц. Список литературных источников включает 315 наименований, из них 234 на английском языке.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность своему научному руководителю к.б.н., в.н.с. Ю.А. Курбатовой и всему коллективу Лаборатории биогеоценологии им. В.Н. Сукачева ИПЭЭ РАН за помощь в организации экспериментальных наблюдений на сплошной вырубке, за возможность использования в работе данных долговременных эколого-климатических наблюдений, проводимых на базе Южно-Валдайской экологической обсерватории

ИПЭЭ РАН «Оковский лес», а также за ценные советы и конструктивное обсуждение результатов исследования. Автор благодарен руководству и сотрудникам Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника за предоставленную возможность работы на территории Заповедника и содействие в организации и проведении наблюдений.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РНФ № 14-14-00956, РФФИ и РГО №17-05-41127 РГО\_а, Программ Президиума РАН «Биоразнообразие природных систем и биологические ресурсы России» и «Изменение климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования».

### **Основное содержание работы**

Во **Введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, описаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

### **Глава 1. Климаторегулирующие функции экосистем бореальных лесов и последствия сплошной вырубki леса**

В главе рассматриваются основные биогеофизические и биогеохимические процессы, определяющие энерго- и массообмен (ЭМО) лесных экосистем с атмосферой и роль этих процессов в регуляции климата на разных уровнях пространственного масштаба. Приводится литературный обзор современных представлений о влиянии сплошной вырубki леса на климаторегулирующие функции экосистем бореальных лесов. Рассматриваются результаты экспериментальных наблюдений за потоками тепла, влаги и диоксида углерода на вырубках разных лет зарастания. На основе обобщения литературных данных показано, что вырубka приводит к трансформации основных компонентов радиационного, теплового, водного и углеродного балансов лесной экосистемы (Amiro, 2001; Coursolle et al., 2012; Hornbeck, 1970; Olchev et al., 2009; Uri et al., 2019; Williams et al., 2014), а также к смене экологических условий произрастания растительности (Мелехов, 1972; Уланова, 2006; Keenan, Kimmins, 1993). Анализ

результатов выполненных ранее исследований показал, что современные оценки изменения климаторегулирующих функций лесных экосистем бореальной зоны в результате вырубki крайне ограничены и характеризуются значительной неопределённостью из-за неоднородности экологических условий в пределах биома и недостатка данных долговременных экспериментальных наблюдений за ЭМО нарушенных лесных экосистем (Hirata et al., 2014; IPCC, 2018; Matthews et al., 2017; Paul-Limoges et al., 2015; Schaphoff et al., 2016).

## Глава 2. Объекты исследования

Экспериментальные исследования были выполнены в охранной зоне Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника (ЦЛГПБЗ) на юго-западе Валдайской возвышенности (Нелидовский р-н, Тверская обл.). Территория заповедника относится к атлантико-континентальной европейской области умеренного климатического пояса (Алисов, 1956). За период 1981 – 2010 гг. средняя температура воздуха по данным метеостанции «Горопец» составила 5.2 °С, а средняя годовая сумма осадков — 758 мм. В последние 40 лет на юго-западе Валдайской возвышенности наблюдается положительный тренд средней годовой температуры воздуха (0.43 °С/10 лет) и годовой суммы осадков (1.7 мм/10 лет). Растительность заповедника представлена типичными для южной тайги сообществами, в основном ельниками (Карпов, 1973; Минаева и др., 2008; Пузаченко и др., 2010).

Экспериментальные наблюдения были проведены в неморальном (кислично-щитовниковом) ельнике (ЕН) и на сплошной вырубке (СВ) (Рисунок 1). ЕН находится на хорошо дренируемом относительно ровном участке моренной гряды с уклоном <math><1^\circ</math>. Преобладают дерново-подзолистые и дерново-палево-подзолистые почвы. Растительность ЕН представлена типичными для европейской южной тайги видами: ель европейская (*Picea abies*), клён остролистый (*Acer platanoides*), вяз голый (*Ulmus glabra*), осина обыкновенная (*Populus tremula*) и берёза пушистая (*Betula pubescens*). В травянистом ярусе преобладают: щитовник мужской (*Dryopteris filix-mas*) и кислица обыкновенная (*Oxalis acetosella*) (Kurbatova et al., 2008; Kuricheva et al., 2017). Возраст деревьев достигает 170 лет. Высота древесного

яруса составляет в среднем 30 – 35 м. Индекс листовой поверхности ( $LAI$ ) в пик вегетационного периода оценивается в  $6.5 \text{ м}^2 \cdot \text{м}^{-2}$ .

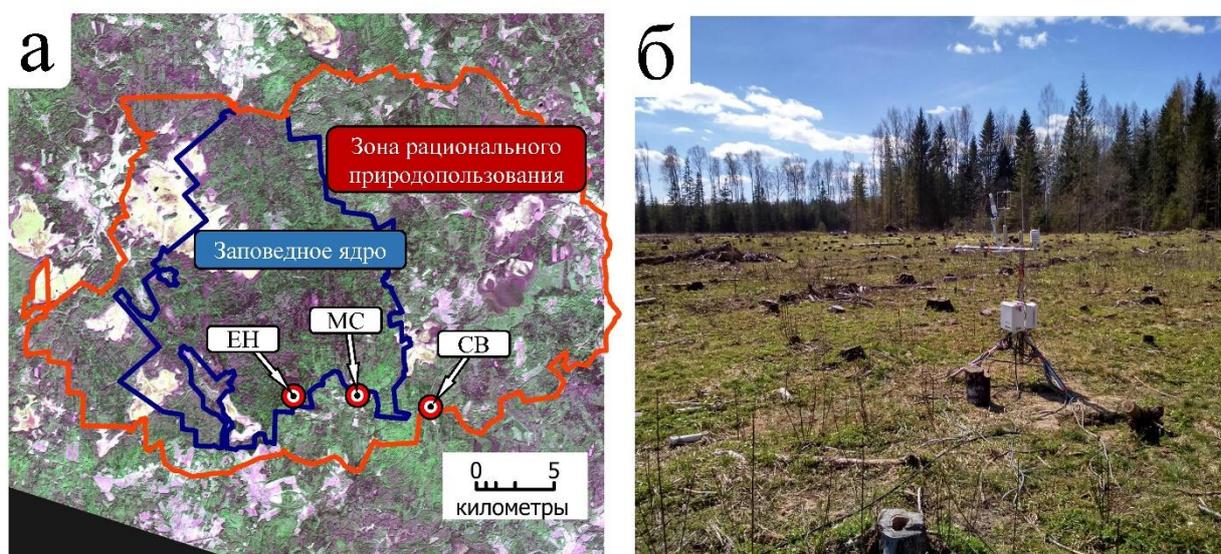


Рисунок 1. (а) Расположение объектов исследования — неморального ельника (ЕН) и сплошной вырубке (СВ), а также метеостанции «Лесной Заповедник» (МС) на территории Центрально-Лесного биосферного заповедника. Синей линией показаны границы ядра заповедника, красной — границы зоны рационального природопользования на спутниковом снимке (LANDSAT-8). (б) Фото СВ (май 2017).

Сплошная вырубка расположена в 8 км к юго-востоку от ЕН. Площадь вырубке составляет 4.5 га. СВ также находится на относительно ровном участке моренной гряды с уклоном поверхности  $<1^\circ$ . Преобладают дерново-палево-подзолистые почвы. В древесном ярусе до вырубке преобладали: ель европейская, берёза повислая (*Betula pendula*), клён остролистый, осина обыкновенная и рябина обыкновенная (*Sorbus acuraria*). Вырубка леса была завершена в апреле 2016 года ( $LAI=0 \text{ м}^2 \cdot \text{м}^{-2}$ ). В первый год вырубка зарастала, в основном за счёт различных видов травянистой растительности, подростка осины обыкновенной и ольхи чёрной (*Alnus glutinosa*). Средняя высота деревьев составляла 70 – 90 см. Зимой 2016 – 2017 гг. весь подрост над снежным покровом (около 1 м) был съеден животными. В 2018 г. возобновилось восстановление древесной растительности. Максимальные

величины  $LAI$  вегетационного периода достигали  $2.6 \text{ м}^2 \cdot \text{м}^{-2}$  в 2016 г., 4.5 в 2017 г. и 3.8 в 2018 г.

Таким образом, положение в рельефе, одинаковые климато-эдафические условия, близкий видовой состав растительности позволяют с определённой долей допущений считать идентичными процессы ЭМО с атмосферой, в двух экосистемах до вырубki леса, а сравнение экосистем после антропогенного вмешательства позволяет оценить роль сплошной вырубki в трансформации климаторегулирующих функций.

В основу работы легли данные экспериментальных наблюдений 2016, 2017 и 2018 гг. Для сравнения средних величин и сумм потоков тепла, влаги и  $\text{CO}_2$  был выбран период, соответствующий непрерывным наблюдениям в течение трех лет, с 6 мая по 18 октября. Выбранные годы отличались условиями температурно-влажностного режима. Средняя температура воздуха в период с мая по октябрь в 2016 г. была равна  $13.8^\circ\text{C}$ , в 2017 г.  $12.3^\circ\text{C}$ , а в 2018 г.  $14.3^\circ\text{C}$ , при климатической норме для периода 1981 – 2010 гг.  $12.9^\circ\text{C}$  (по данным метеостанции «Торопец»). Сумма осадков с мая по октябрь составила 479 мм в 2016 г., 568 мм в 2017 г. и 355 мм в 2018 г., при годовой норме осадков 479 мм (по данным метеостанции «Лесной заповедник»). На вегетационные периоды 2016 и 2018 гг. пришлись преимущественно положительные аномалии средней месячной температуры воздуха, а на 2017 г. — отрицательные. В вегетационные периоды 2016 и 2017 гг. наблюдались в основном положительные аномалии месячной суммы осадков, а в 2018 г. — отрицательные. Равномерное распределение осадков в течение вегетационных периодов поддерживало близкую к насыщению величину объёмного влагосодержания почвы ( $SWC$ ) как в ЕН (до  $0.67 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}$ ), так и на СВ (до  $0.43 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}$ ). Несмотря на различия температурно-влажностного режима в годы наблюдений отсутствовали периоды засух, таким образом, процессы энерго- и массообмена экосистем с атмосферой не лимитировались запасами влаги.

### **Глава 3. Методы**

Экспериментальные оценки экосистемных потоков тепла,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$  были получены на основе метода турбулентных пульсаций (Eddy covariance method)

(Burba et al., 2016). Метод основан на одновременных высокочастотных измерениях вертикальной составляющей скорости ветра, температуры воздуха и концентрации исследуемой субстанции над растительным покровом, что предполагает возведение специальных мачт (вышек), высота которых определяется высотой растительности. Измерения в ЕН были начаты в 1999 г., а на СВ — в апреле 2016 г., сразу по окончании лесозаготовительных работ. Датчики для пульсационных и метеорологических наблюдений были установлены на высоте 42 м в ЕН и на 3 м на СВ. Пульсации скорости ветра и температуры воздуха определялись с помощью трёхкомпонентных акустических анемометров WindMaster Pro (Gill Instruments, Великобритания), а пульсации концентрации  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$  газоанализаторами LI-7200A (LI-COR Inc., США) в ЕН и LI-7500A (LI-COR Inc., США) на СВ. Запись данных осуществлялась с частотой 10 Гц с помощью регистратора LI-7550 (LI-COR Inc., США).

Метеорологические наблюдения включали измерения потоков радиации в коротковолновых и длинноволновых частях спектра, приходящей фотосинтетически активной радиации, температуры и относительной влажности воздуха, атмосферного давления, количества осадков, направления и скорости ветра, температуры и объёмного влагосодержания почвы и потока тепла в почву. Данные метеорологических наблюдений регистрировались с частотой 0.1 Гц и сохранялись на регистраторах LI-COR Biomet system 103 (LI-COR Inc., США) в ЕН и CR3000 (Campbell Sci. Inc., США) на СВ. Таким образом, эколого-климатические станции (ЭКС) в ЕН и на СВ представляли программно-аппаратные комплексы, включающие приборы для метеорологических и пульсационных наблюдений, закреплённые на специальных мачтах, а также оборудование для регистрации данных и энергообеспечения.

Дополнительно, на СВ были организованы периодические измерения дыхания почвы методом закрытых камер с использованием газоанализатора LI-840 (LI-COR Inc., США), и была выполнена регулярная оценка индекса листовой поверхности (*LAI*) лаиметром AccuPAR LP-80 (Decagon Devices Inc., США).

Обработка данных измерений проводилась в полном соответствии с методическими рекомендациями, используемыми на сети станций FLUXNET (Aubinet et al., 2012; Burba, 2013; Burba et al., 2016). Расчёт потоков чистого

экосистемного обмена  $\text{CO}_2$  ( $NEE$ ), потоков явного ( $H$ ) и скрытого тепла ( $LE$ ), а также суммарного испарения ( $ET$ ) осуществлялся с помощью специализированного программного обеспечения Eddy Pro (LI-COR Inc., США). При расчётах применялись все необходимые коррекции и статистические тесты, определяющие качество данных. Для потоков  $H$  и  $LE$  были учтены изменения запасов тепла в пределах деятельного слоя (storage) и проведена коррекция на невязку теплового баланса (Aubinet et al., 2012; Foken, 2008). Отбор данных проводился с учётом информации о конфигурации зоны охвата и стратификации атмосферы. Для фильтрации данных по критерию динамической скорости ( $u^*$ -filtering), заполнения пропусков и расчёта экосистемного дыхания ( $TER$ ) и валовой первичной продукции ( $GPP$ ) на основе  $NEE$  применялся онлайн-инструмент REddy Proc (Wutzler et al., 2018).

Таким образом, для выполнения задач исследования были использованы непрерывные ряды исследуемых параметров с шагом 0.5 ч. Идентичные процедуры измерения, проверки качества данных и заполнения пропусков позволяют сравнивать результаты измерений в двух экосистемах.

Достоверность различий средних суточных сумм потоков  $NEE$ ,  $TER$ ,  $GPP$ ,  $H$  и  $LE$  между ЕН и СВ проверялась с использованием t-критерия Стьюдента для зависимых выборок. Выборки данных, использованные для сравнительного анализа, прошли проверку на соответствие критериям нормального распределения (тест Шапиро-Уилка,  $p > 0.05$ ).

Неопределённость оценок потоков может быть вызвана как случайными, так и систематическими погрешностями (Aubinet et al., 2012). Использование стандартизированного программного обеспечения позволяет минимизировать их влияние через фильтрацию данных с использованием статистических тестов и применением необходимых поправок. Систематические погрешности, как правило, компенсируются введением коррекций. Влияние случайных погрешностей минимизируется за счёт выбора длительных временных интервалов интегрирования. Неопределённость, связанная с влиянием случайных погрешностей на оценки потоков тепла,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ , оценивалась в рамках инструментов программного обеспечения REddyProc (Wutzler et al., 2018). Неопределённость, вызванная случайной погрешностью, не превышала 5% от

величины сезонных сумм потоков  $H$  и 2% от величины потока  $LE$ . Неопределённость расчёта сезонных сумм  $TER$  и  $GPP$  на основе  $NEE$  не превышала 3%.

#### Глава 4. Тепловой баланс экосистем

В результате вырубки леса происходит изменение свойств подстилающей поверхности и, как следствие, изменение величины радиационного баланса ( $Rn$ ) — ключевого показателя энергообеспеченности экосистемы. Характерной особенностью неморального ельника в условиях южной тайги ЕТР является относительно низкая величина альbedo растительного покрова, что обеспечивает высокие величины  $Rn$ . В результате удаления древостоя происходит увеличение альbedo, снижение поглощения суммарной солнечной радиации и уменьшение величины  $Rn$ . Наиболее заметное увеличение альbedo в результате удаления древостоя происходит в зимние месяцы, поскольку вырубка зимой полностью покрыта снегом. Так альbedo ЕН в зимние месяцы 2016, 2017 и 2018 гг. не превышало 35%, а на СВ наблюдались значения альbedo выше 90%. Рост альbedo подстилающей поверхности в результате удаления древостоя наблюдается и в вегетационный период. Так, в летние месяцы альbedo ЕН составляло 8%, при этом альbedo СВ изменялось, в среднем, от 15 до 30%.

Увеличение альbedo подстилающей поверхности в вегетационный период является широко распространённым следствием нарушений (сплошной вырубки, пожаров, ветровалов и т.п.) экосистем темнохвойных и смешанных темнохвойно-широколиственных лесов, поскольку травянистая и мелколиственная древесная растительность, которой чаще всего зарастают нарушенные лесные экосистемы, имеет бóльшую отражающую способность, чем темнохвойные породы деревьев (Cherubini et al., 2012; Lyons et al., 2008; McCaughey, 1985; Rannik et al., 2002). Различие в альbedo деятельной поверхности исследуемых экосистем являлось основным фактором достоверно значимых различий величин средних суточных сумм  $Rn$  СВ и ЕН (t-тест Стьюдента для зависимых выборок  $p < 0.01$ ). Суммы  $Rn$  для периода 06.05 – 18.10 на СВ были ниже, чем в ЕН на 42% в 2016 г., на 41% в 2017 г. и на 33% в 2018 г. Данный результат согласуется с современными представлениями

о влиянии природных и антропогенных нарушений на радиационный баланс лесных экосистем хвойных лесов (Bonan, 2008; IPCC, 2014).

Свыше 90% энергии  $R_n$  экосистемы затрачивается на обмен явным ( $H$ ) и скрытым ( $LE$ ) теплом с атмосферой. Снижение  $R_n$  приводит к изменению абсолютных величин и соотношения между потоками  $H$  и  $LE$ . В рамках настоящего исследования было получено, что средние суточные суммы турбулентного потока тепла ( $H$ ) и затрат тепла на суммарное испарение ( $LE$ ) в период 06.05 – 18.10 на СВ были статистически значимо ниже чем в ЕН во все три года наблюдений (t-тест Стьюдента для зависимых выборок,  $p < 0.01$ ) (Рисунок 2). Суммы потока  $H$  на СВ были ниже, чем в ЕН на 34% в первый год наблюдений, на 46% во второй год и на 37% в третий (Таблица 1). Суммы потока  $LE$  на СВ были ниже на 37% в 2016 г., на 28% в 2017 г. и на 23% в 2018 г. Поток тепла в почву ( $G$ ) в ЕН составлял 7 – 9% от  $R_n$ , а на СВ доля  $G$  снижалась от 14% в первый год после нарушения до 6% к третьему году наблюдений.

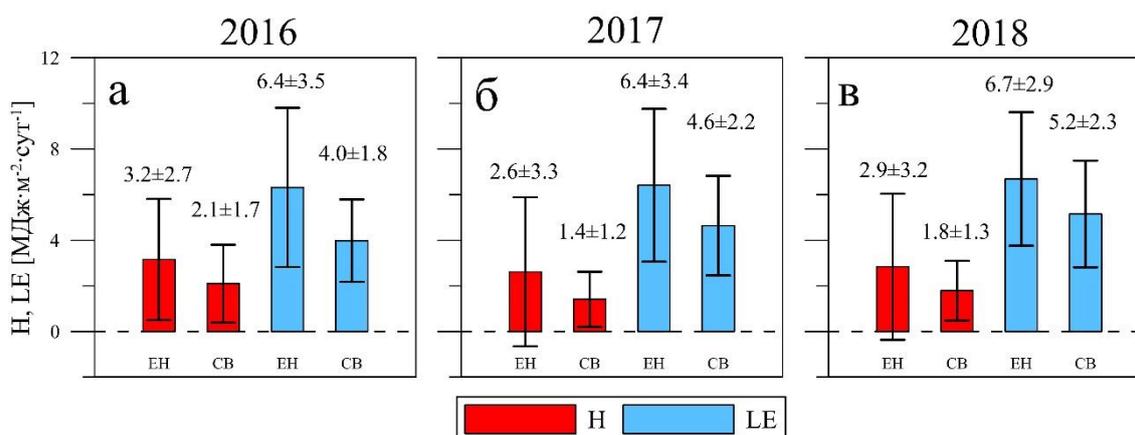


Рисунок 2. Средние за период 06.05 – 18.10 суточные суммы потоков явного ( $H$ ) и скрытого тепла ( $LE$ ) в неморальном ельнике (ЕН) и на сплошной вырубке (СВ) в 2016 (а), 2017 (б) и в 2018 (в) гг. Вертикальными линиями показана величина стандартного отклонения ( $\pm SD$ ).

Изменение величин  $H$  и  $LE$  после вырубki леса может происходить по-разному в зависимости от типа леса и погодных условий конкретного года. Результатами экспериментальных исследований экосистемных потоков тепла

подтверждено, что вырубка в условиях бореальных лесов приводит к значительному снижению затрат тепла на суммарное испарение (Amiro, 2001; Kowalski et al., 2003; Rannik et al., 2002), при этом оценки возможного влияния сплошной вырубки на величину  $H$  различаются. Например, в работах (Amiro, 2001; Amiro et al., 2006) на основе параллельных пульсационных наблюдений было получено, что вырубка лесов с преобладанием тополя осинообразного (*Populus tremuloides*), тополя бальзамического (*Populus balsamifera*) и сосны Банкса (*Pinus banksiana*) в Канаде приводит к снижению величины  $H$  в вегетационный период, что соответствует результатам настоящего исследования. Результаты параллельных наблюдений (Rannik et al., 2002) в зрелом древостое сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) и на сплошной вырубке в Финляндии напротив, свидетельствуют о том, что вырубка может приводить и к росту величины  $H$ .

Таблица 1. Радиационный баланс ( $Rn$ ), суммы потоков явного ( $H$ ) и скрытого тепла ( $LE$ ), а также средняя величина отношения Боуэна ( $\beta$ ) за период 06.05 – 18.10 2016, 2017 и 2018 гг. в неморальном ельнике (ЕН) и на сплошной вырубке (СВ).

|                             | 2016   |        | 2017   |        | 2018   |        |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                             | ЕН     | СВ     | ЕН     | СВ     | ЕН     | СВ     |
| $Rn$ [МДж·м <sup>-2</sup> ] | 1672.5 | 1033.3 | 1585.1 | 1060.4 | 1671.5 | 1182.4 |
| $H$ [МДж·м <sup>-2</sup> ]  | 526.9  | 348.3  | 437.2  | 234.5  | 474.1  | 296.9  |
| $LE$ [МДж·м <sup>-2</sup> ] | 1054.8 | 661.5  | 1070.9 | 770.5  | 1116.6 | 855.2  |
| $\beta$                     | 0.50   | 0.53   | 0.41   | 0.30   | 0.43   | 0.35   |

Как правило, снижение затрат тепла на суммарное испарение в результате вырубки приводит к изменению структуры теплового баланса лесной экосистемы — увеличению отношения Боуэна ( $\beta=H/LE$ ). Высокие величины отношения Боуэна на СВ ( $\beta=1.0$ ), по сравнению с величинами  $\beta$  в ЕН ( $\beta=0.5$ ), наблюдались только в июне 2016 г. С увеличением  $LE$  по мере зарастания вырубки происходило снижение  $\beta$ . Уже к концу июля величины отношения Боуэна ЕН и СВ сравнялись. Преобладание затрат тепла на суммарное испарение в структуре расходной части теплового баланса СВ сохранялось и в следующие годы. Это характерно не для всех сплошных вырубок первых лет зарастания. В большинстве экспериментальных

исследований потоков тепла на свежих вырубках ельников и сосняков в Европе и Северной Америке были отмечены величины  $\beta > 1$  (Korkiakoski et al., 2019; Kowalski et al., 2003; Williams et al., 2014). Быстрое восстановление отношения Боуэна после нарушения на СВ связано с характерными для подзоны южной тайги экологическими условиями. Отсутствием недостатка влаги для физического испарения и транспирации и достаточной обеспеченностью солнечной радиацией и теплом. Высокие темпы зарастания, а также увеличения  $LAI$  способствовали быстрому восстановлению транспирации и росту затрат тепла на суммарное испарение.

Процессы преобразования энергии в экосистеме связаны с переходом энергии из концентрированной формы в рассеянную и продукцией термодинамической энтропии. Для сохранения своей сложной структуры и устойчивого функционирования биологическим системам необходимо поддерживать состояние с высокой степенью внутренней упорядоченности (Одум, 1986; Jørgensen, 2007). Отрицательный баланс энтропии экосистемы достигается за счёт обмена термодинамической энтропией с внешней средой, прежде всего, через радиационный и турбулентный перенос энергии в атмосферу. Согласно принципу максимума продукции энтропии (Kleidon, 2009; Lin, 2015), продукция энтропии увеличивается по мере развития экосистемы, а природные или антропогенные нарушения приводят, напротив, к её снижению.

Исследование составляющих баланса термодинамической энтропии экосистем показали, что баланс энтропии ЕН и СВ был преимущественно отрицательным. Основным источником энтропии в обеих экосистемах являлась продукция энтропии ( $EP$ ), связанная с преобразованием суммарной радиации в тепловую энергию, а наиболее эффективным механизмом обмена энтропией с внешней средой были потоки  $H$ ,  $LE$  и собственное длинноволновое излучение поверхности. На СВ величина  $EP$  была ниже, чем в ЕН во все три года наблюдений (t-тест Стьюдента для зависимых выборок,  $p < 0.01$ ). Суммы  $EP$  за период 06.05 – 18.10 составили в ЕН  $7.7 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$  в 2016 г.,  $7.3 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$  в 2017 г. и  $8.0 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$  в 2018 г., а на СВ  $5.6 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$  в 2016 г.,  $5.2 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$  в 2017 г. и  $5.9 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$  в 2018 г.

Принцип максимума продукции энтропии предполагает, что по мере развития экосистемы  $EP$  приближается к своей максимально возможной величине. Максимально возможную величину  $EP$  можно приближённо рассчитать на основе эмпирических данных для конкретных условий окружающей среды. Определяемая эмпирически величина максимально возможной продукции энтропии ( $EMEP$ ) соответствует условиям, когда вся проходящая коротковолновая радиация поглощается экосистемой и затрачивается лишь на суммарное испарение, биологические процессы и различные химические реакции. Таким образом, вырубка леса должна приводить к снижению отношения  $EP/EMEP$ . На основе данных наблюдений было получено, что отношение  $EP/EMEP$  в период 06.05 – 18.10 для ЕН составило 0.91 во все годы измерений, а на СВ 0.75 в 2016 г., 0.76 в 2017 г. и 0.77 в 2018 г.

Таким образом, результаты расчёта составляющих баланса энтропии,  $EP$  и отношения  $EP/EMEP$  соответствуют принципу максимума продукции энтропии и современным представлениям об изменении  $EP$  в результате нарушения лесных экосистем (Aoki, 2008; Brunzell et al., 2011; Lin, 2015; Wiesner et al., 2019). Величина  $EP$ , в первую очередь, определяется альбедо поверхности и отношением Боуэна (Holdaway et al., 2010; Kuricheva et al., 2017; Skene, 2013; Stoy et al., 2014a; Wiesner et al., 2019). Поскольку  $LE$  является более эффективным способом переноса тепла в отсутствие недостатка влаги, увеличение доли  $LE$  в расходной части теплового баланса приводит к росту диссипации энергии экосистемой. Увеличение  $EP$  в процессе восстановительной сукцессии экосистемы соответствует принципу максимума продукции энтропии и может быть связано со снижением альбедо и ростом  $LE$  (Holdaway et al., 2010).

## Глава 5. Суммарное испарение экосистем

Удаление древостоя приводит к изменению водного баланса за счёт снижения суммарного испарения ( $ET$ ) экосистемы. Результаты наблюдений показали, что суммы  $ET$  на СВ за период 06.05 – 18.10 были ниже чем в ЕН на 37% в первый год зарастания, на 28% во второй, и на 23% в третий (Таблица 2, Рисунок 3). В условиях достаточного увлажнения вырубка леса может приводить к

увеличению стока и заболачиванию территории, поскольку осадки могут значительно превышать испарение (Keenan, Kimmins, 1993; Rahmat et al., 2018). В рамках настоящего исследования было получено, что суммы  $ET$  у ЕН и СВ за период 06.05 – 18.10 могут быть как меньше, так и больше сумм осадков указанного периода в зависимости от температурно-влажностного режима года наблюдений (Таблица 2). Таким образом, вырубка леса не приводит к устойчивому превышению сумм осадков над  $ET$  в вегетационный период. При этом положительный водный баланс на уровне годовых сумм в условиях южной тайги ЕТР сохраняется благодаря обильным осадкам зимнего периода. Летом  $ET$  ЕН и СВ было ниже величин потенциальной эвапотранспирации ( $PET$ ) рассчитанных с помощью уравнения Прейстли-Тейлора (Fisher et al., 2011; Priestley, Taylor, 1972).

Вырубка леса способна приводить и к изменению вклада различных факторов окружающей среды, определяющих величину  $ET$ . Эти факторы подразделяются на радиационные и аэродинамические. Определить их соотношение возможно с помощью коэффициента  $\Omega$  из уравнения Пенмана-Мантиса в виде, представленном (McNaughton, Jarvis, 1983):

$$LE = \Omega \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot (Rn - G - \Delta St) + (1 - \Omega) \cdot \left( \frac{\rho_a \cdot C_p}{\gamma} \right) \cdot \frac{VPD}{r_c} \quad (1)$$

где  $\Delta$  — скорость изменения давления насыщения водяного пара в воздухе с изменением температуры воздуха ( $T_a$ ) [ $\text{Па} \cdot \text{K}^{-1}$ ],  $\gamma$  — психрометрическая константа [ $\text{Па} \cdot \text{K}^{-1}$ ].  $r_c$  — сопротивление растительного полога [ $\text{с} \cdot \text{м}^{-1}$ ], а  $r_a$  — аэродинамическое сопротивление [ $\text{с} \cdot \text{м}^{-1}$ ],  $\Delta St$  — изменение запасов тепла в пределах деятельного слоя [ $\text{Дж} \cdot \text{м}^{-2}$ ],  $\rho_a$  — плотность воздуха [ $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ],  $C_p$  — удельная теплоёмкость воздуха при постоянном давлении [ $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$ ],  $VPD$  — дефицит влажности [ $\text{кПа}$ ].

При  $\Omega=1$  величина  $ET$  определяется доступной энергией (радиационные факторы), а различия  $ET$  экосистем вызваны локальными особенностями  $Rn$ ; при  $\Omega=0$   $ET$  зависит от величины  $VPD$ , при этом устьичное сопротивление может выступать как лимитирующий фактор. Для лесных экосистем характерно преобладание аэродинамических факторов ( $\Omega < 0.5$ ), однако вырубка способна

привести к значительному увеличению вклада радиационных факторов в формирование величины  $ET$  ( $\Omega > 0.5$ ) (McNaughton, Jarvis, 1983).

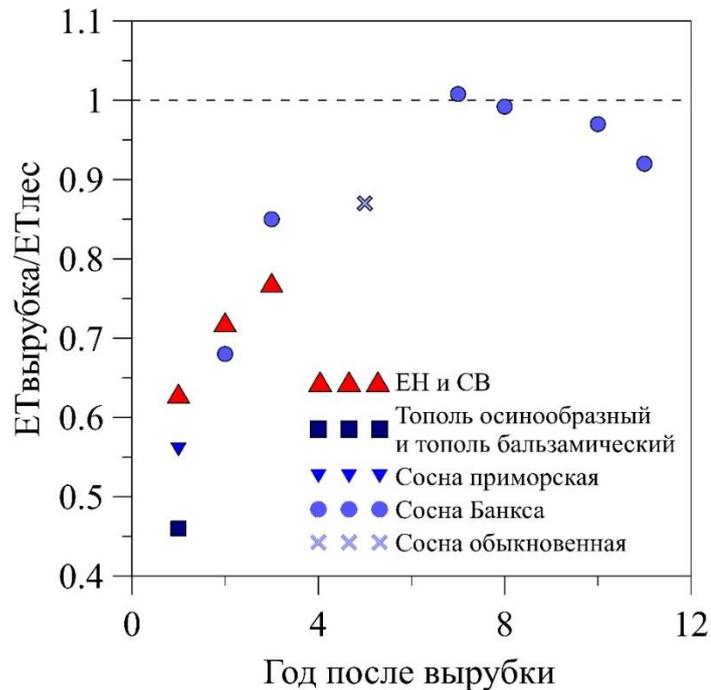


Рисунок 3. Отношение величины суммарного испарения на вырубке ( $ET_{\text{вырубка}}$ ) к величине суммарного испарения на контрольном участке со зрелым древостоем ( $ET_{\text{лес}}$ ). Данные получены на основе экспериментальных наблюдений методом турбулентных пульсаций на вырубках и в естественных лесных экосистемах тополя осинообразного и тополя бальзамического на западе Канады (Amiro, 2001); сосны приморской (*Pinus pinaster*) на юго-западе Франции (Kowalski et al., 2003); сосны Банкса (Amiro et al., 2006; Mkhabela et al., 2009) в центральной Канаде; сосны обыкновенной на юге Финляндии (Rannik et al., 2002) и по результатам настоящего исследования.

В рамках настоящего исследования было показано, что во все три года наблюдений  $ET$  как у ЕН, так и у СВ определялось, в первую очередь, аэродинамическими факторами (Таблица 2). Полученные в рамках настоящего исследования оценки коэффициента  $\Omega$  для двух экосистем соответствуют диапазону изменчивости данного показателя для хвойных (0.11 – 0.17),

широколиственных (0.12 – 0.25) и смешанных лесов (0.16 – 0.25), а также лугов (0.16 – 0.22) (Brümmer et al., 2012).

Снижение *ET* экосистемы в результате вырубки характерно для бореальных лесов в целом (Amiro, 2001; Amiro et al., 2006; Bonan, 2008; Kowalski et al., 2003; Mkhabela et al., 2009; Rannik et al., 2002). По оценкам (Sun et al., 2008), основанных на данных измерений в Северной Америке, для восстановления *ET* нарушенной лесной экосистеме требуется от 8 до 25 лет.

Таблица 2. Суммарное испарение (*ET*), потенциальная эвапотранспирация (*PET*), суммы атмосферных осадков (*Pr*) и средняя величина коэффициента  $\Omega$  ( $\pm$  стандартное отклонение) в неморальном ельнике (ЕН) и на сплошной вырубке (СВ) за период 06.05 – 18.10 2016, 2017 и 2018 гг.

|                 | 2016            |                 | 2017            |                 | 2018            |                 |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                 | ЕН              | СВ              | ЕН              | СВ              | ЕН              | СВ              |
| <i>ET</i> [мм]  | 429.6           | 269.4           | 436.2           | 313.8           | 454.8           | 348.3           |
| <i>PET</i> [мм] | 624.2           | 366.4           | 531.8           | 352.1           | 584.6           | 378.4           |
| <i>Pr</i> *[мм] | 427.9           |                 | 532.7           |                 | 319.7           |                 |
| $\Omega$        | 0.13 $\pm$ 0.08 | 0.14 $\pm$ 0.07 | 0.12 $\pm$ 0.08 | 0.17 $\pm$ 0.09 | 0.10 $\pm$ 0.06 | 0.11 $\pm$ 0.05 |

\* — величины *Pr* приведены по данным метеостанции «Лесной заповедник».

Сравнение с результатами других экспериментальных исследований, на основе одновременных наблюдений за экосистемными потоками  $H_2O$  в зрелых лесах и на сплошных вырубках, указывает на относительно быстрое восстановление *ET* на СВ в первый год после нарушения (Рисунок 3), что может объясняться высокими темпами зарастания СВ и благоприятными условиями температурно-влажностного режима.

## Глава 6. Потоки CO<sub>2</sub>

В результате вырубки леса происходит изменение углеродного баланса — экосистема становится источником CO<sub>2</sub> для атмосферы на период от нескольких лет до десятилетий. Как правило, это происходит за счёт значительного уменьшения валовой первичной продукции (*GPP*) при небольших изменениях экосистемного дыхания, поскольку снижение автотрофного дыхания в результате удаления древостоя компенсируется усилением разложения мёртвого органического вещества (Amigo et al., 2010). Расчёт потоков CO<sub>2</sub> для ЕН и СВ показал, что на уровне сумм чистого экосистемного обмена (*NEE*) за период 06.05 – 18.10 СВ была источником CO<sub>2</sub> для атмосферы (*NEE*>0) во все три года наблюдений, в то время как ЕН был как источником, так и стоком (*NEE*<0) атмосферного CO<sub>2</sub> в зависимости от погодных условий вегетационного периода (Рисунок 4, Рисунок 5 и Таблица 3). На уровне суточных сумм *NEE* СВ была источником CO<sub>2</sub> для атмосферы в течение всего 2016 г. Преобладание поглощения диоксида углерода над его эмиссией наблюдалось, в среднем, в период с мая по июль 2017 и 2018 гг. Различия *NEE* ЕН и СВ в 2016 г. и 2017 г. определялись, в первую очередь, различиями *GPP*. На третий год различия средних суточных сумм *NEE* объясняются в основном различиями *TER*.

Суммы *TER* и *GPP* за период 06.05 – 18.10 в ЕН составляли от 85 до 89% от годовых сумм *TER* и от 89 до 93% годовых сумм *GPP* соответственно. Преобладание поглощения над эмиссией CO<sub>2</sub> в ЕН было зафиксировано уже в отдельные дни февраля. Таким образом, в условиях южной тайги ЕТР сплошная вырубка может оказывать влияние на годовые суммы *NEE* не только за счёт изменения величин *GPP* и *TER* в вегетационный период, но и частично за счёт смещения даты начала фотосинтеза.

Анализ результатов экспериментальных исследований на основе литературных источников показал значительные вариации оценок потоков CO<sub>2</sub> на свежих сплошных вырубках в хвойных и широколиственных лесах умеренного климатического пояса. Получено, что в первые три года зарастания средние суточные суммы *NEE* изменяются в диапазоне от 0.3 до 8.5 гС·м<sup>-2</sup>·сут<sup>-1</sup>, *TER* от 0.7 до 10.2 гС·м<sup>-2</sup>·сут<sup>-1</sup>, а *GPP* от 0.3 до 4.4 гС·м<sup>-2</sup>·сут<sup>-1</sup>. Таким образом, оценки *TER* и *GPP* СВ оказались выше оценок, полученных на других вырубках в условиях

распространения хвойных и широколиственных лесов умеренного климатического пояса. При этом отношение  $GPP/TER$  СВ (Таблица 3) соответствует диапазону изменчивости данного показателя (0.2 – 1.2) для сплошных вырубок ранних лет зарастания в Северной Америке (Amiro et al., 2010). В то же время отношение  $GPP/TER$  ЕН было ниже характерных значений этого отношения для темнохвойных (1.2 – 2.0) и широколиственных (1.1 – 2.3) лесов в центральной Европе (Falge et al., 2002). Оценка соотношения между гетеротрофным ( $R_{het}$ ) и автотрофным дыханием, на основе данных о  $TER$  и  $GPP$  ( $R_{het} = TER - 0.55 \cdot GPP$ ) (Jassal et al., 2007; Landsberg, Waring, 1997; Amiro et al., 2010), показала, что в ЕН гетеротрофное дыхание могло составлять от 38%  $TER$  в 2018 г., до 46% в 2016 г. На СВ доля гетеротрофного дыхания в первый год составляла 68%  $TER$ , 54% в 2017 г. и 58% в 2018 г. По данным литературных источников, доля гетеротрофного дыхания на сплошных вырубках в первый год зарастания варьирует от 67 до 95% (Mamkin et al., 2019).

Таблица 3. Чистый экосистемный обмен  $CO_2$  ( $NEE$ ), валовая первичная продукция ( $GPP$ ), экосистемное дыхание ( $TER$ ), отношение  $GPP/TER$  и средняя величина эффективности использования воды при ассимиляции атмосферного  $CO_2$  ( $WUE$ ) в процессе фотосинтеза в период с 06.05 по 18.10 2016, 2017 и 2018 гг. в неморальном ельнике (ЕН) и на сплошной вырубке (СВ).

|                              | 2016   |        | 2017   |        | 2018   |        |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                              | ЕН     | СВ     | ЕН     | СВ     | ЕН     | СВ     |
| $NEE$ [гС·м <sup>-2</sup> ]  | 21.5   | 553.3  | -16.8  | 196.5  | -180.6 | 453.1  |
| $GPP$ [гС·м <sup>-2</sup> ]  | 1318.7 | 777.5  | 1423.4 | 1020.5 | 1533.4 | 1416.4 |
| $TER$ [гС·м <sup>-2</sup> ]  | 1340.3 | 1330.8 | 1404.3 | 1213.7 | 1350.5 | 1866.2 |
| $GPP/TER$                    | 0.98   | 0.58   | 1.01   | 0.84   | 1.14   | 0.76   |
| $WUE$ [гС·мм <sup>-1</sup> ] | 3.07   | 3.15   | 3.26   | 3.78   | 3.37   | 4.30   |

Температурный коэффициент  $Q_{10}$  (Pavelka et al., 2007) составил в ЕН 2.80 в 2016 г. и 3.00 в 2017 г. при использовании температуры воздуха ( $T_a$ ) и 3.71 в 2016 г. и 5.10 в 2017 г. при использовании температуры почвы ( $T_s$ ), что превышало значения коэффициента на СВ (1.92 в 2016 г и 2.08 в 2017 г. при использовании  $T_a$

и 2.86 в 2016 г. и 3.97 в 2017 г. при использовании  $T_s$ ). А в 2018 г., напротив,  $Q_{10}$  на СВ был больше, чем в ЕН:  $Q_{10}$  для  $TER$  ЕН составил в 2018 г. 2.12 при использовании  $T_a$  и 3.00 при использовании  $T_s$ , а  $Q_{10}$  для  $TER$  СВ 2.32 при использовании  $T_a$  и 3.67 при использовании  $T_s$ .

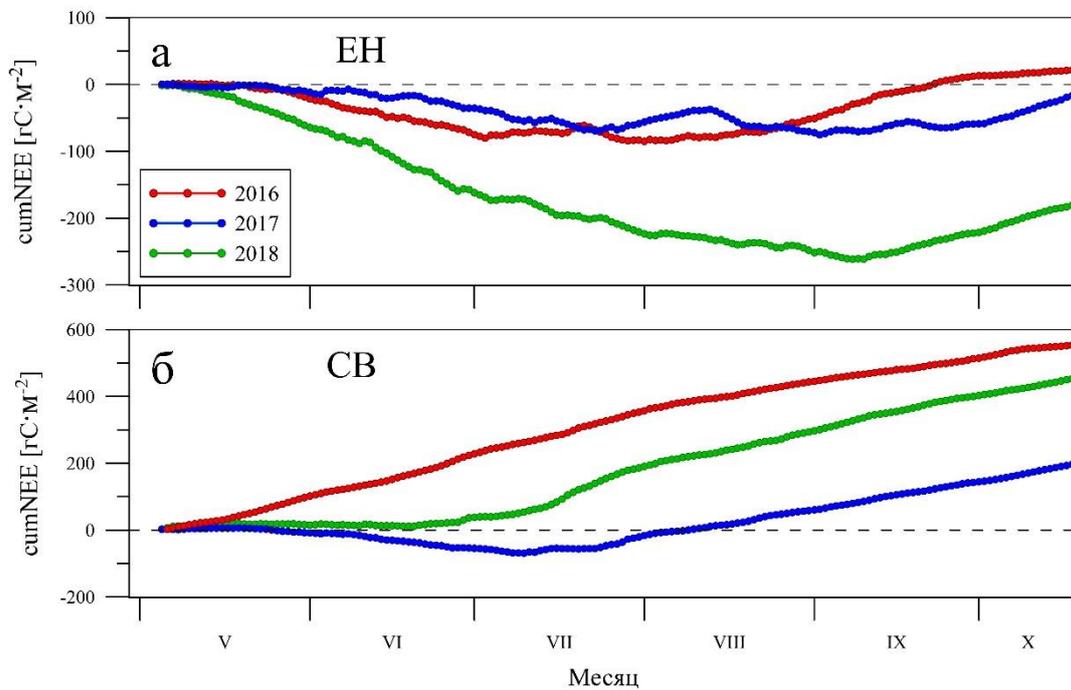


Рисунок 4. Кумулятивные суммы чистого экосистемного обмена CO<sub>2</sub> ( $cumNEE$ ) в неморальном ельнике (ЕН) (а) и на сплошной вырубке СВ (б) в 2016, 2017 и в 2018 гг.

Полученные в рамках настоящего исследования величины  $Q_{10}$  соответствуют диапазону изменчивости этого показателя в биомах бореальных лесов (3.2 – 5.0) и лесов умеренной зоны (1.1 – 5.6) (Chen, Tian, 2005), а также результатам, полученным на основе измерения экосистемного и почвенного дыхания в нарушенных и ненарушенных лесных экосистемах (Bergeron et al., 2008; Giasson et al., 2006; Humphreys et al., 2006 и др.).

Расчёт параметров гиперболической световой кривой Михаэлиса-Ментена (Michaelis, Menten, 1913; Matthews et al., 2017) показал, что эффективность использования солнечной радиации ( $R_g$ ) при фотосинтезе ( $GPP$ ) летом была

выше на СВ, чем в ЕН. Так, средняя месячная величина коэффициента эффективности использования света для июля на СВ увеличилась от 0.14 мкмоль  $\text{CO}_2 \cdot \text{Дж}^{-1}$  в 2016 г. до 0.25 мкмоль  $\text{CO}_2 \cdot \text{Дж}^{-1}$  в 2018 г., а в ЕН данный показатель варьировал от 0.13 до 0.14 мкмоль  $\text{CO}_2 \cdot \text{Дж}^{-1}$ .

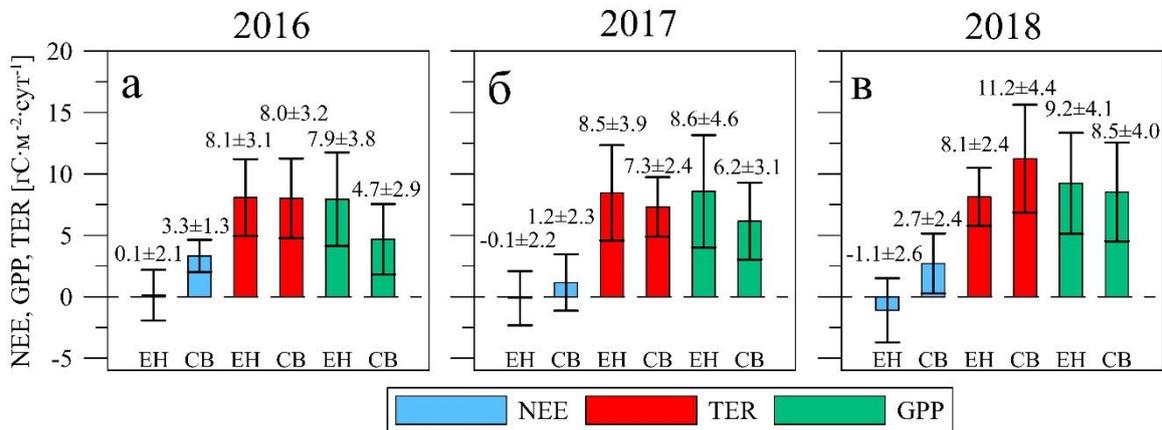


Рисунок 5. Средние за период 06.05 – 18.10 2016 (а), 2017 (б) и 2018 (в) гг. суточные суммы чистого экосистемного обмена  $\text{CO}_2$  (*NEE*), экосистемного дыхания (*TER*) и валовой первичной продукции (*GPP*) в неморальном ельнике (ЕН) и на сплошной вырубке (СВ). Вертикальными линиями показана величина стандартного отклонения ( $\pm SD$ ).

По мере зарастания СВ наблюдался рост эффективности использования воды при фотосинтезе (*WUE*): в 2018 г. *WUE* на СВ была больше, чем в 2016 г. на 27% (Таблица 3). Увеличение эффективности использования света и воды по мере зарастания вырубки отмечалось и в других экспериментальных исследованиях (Coursolle et al., 2006; Korkiakoski et al., 2019; Mathys et al., 2013; Mkhabela et al. 2009; Williams et al., 2014). Быстрый рост *GPP* и *WUE* на СВ отражает специфику экологических условий южной тайги ЕТР, определяющих высокую продуктивность южно-таёжных экосистем и быстрое восстановление функции депонирования атмосферного диоксида углерода после нарушений.

## **Заключение и основные выводы**

Обеспечение устойчивой работы в течение трех лет исследования двух эколого-климатических станций, расположенных в ненарушенном (условно) неморальном ельнике и на сплошной вырубке в условиях южной тайги европейской части России, позволило получить для двух экосистем количественные оценки обменных с атмосферой экосистемных потоков тепла, влаги и диоксида углерода, а также составляющих радиационного баланса и широкого спектра метеорологических параметров. Расположение двух станций в рельефе, одинаковые климатические и почвенные условия, близкий видовой состав растительности до вырубки леса позволяют с определенной долей допущений оценить роль сплошной вырубки в трансформации климаторегулирующих функций лесной экосистемы. Использование стандартизированных методов измерений, обработки и интерпретации результатов, применяемых на международной сети станций наблюдений за потоками парниковых газов FLUXNET, обеспечило сопоставимость данных собственных наблюдений с результатами, получаемыми по аналогичной методике на других станциях. В дополнение к выводам по каждой главе ниже изложены научные результаты и выводы в соответствии с поставленными задачами исследования.

1. Сплошная вырубка неморального ельника в условиях южной тайги ЕТР ведёт к формированию более низких величин радиационного баланса по сравнению с лесной экосистемой, что связано с ростом альбедо деятельной поверхности после удаления древостоя. Радиационный баланс сплошной вырубки в период с мая по октябрь был ниже радиационного баланса неморального ельника на 39% в первый год зарастания, на 33% — во второй и на 20% — в третий. Полученные оценки изменения радиационного баланса согласуются с результатами экспериментальных исследований на вырубках в условиях бореальных лесов Северной Америки, Европы и Азии.

Сплошная вырубка в условиях южной тайги ЕТР снижает диссипацию лучистой энергии и связанной с ней продукции термодинамической энтропии, что соответствует принципу максимума продукции энтропии, согласно которому

продукция энтропии экосистемы минимальна на ранних стадиях сукцессии и максимальна на поздних. Основным фактором снижения продукции энтропии является рост величины альбедо деятельной поверхности после вырубки.

2. Специфика изменения теплового баланса в результате вырубки проявляется, главным образом, в уменьшении потоков явного и скрытого тепла. Поток явного тепла на сплошной вырубке в период с мая по октябрь был ниже на 34%, 46% и 37% в первый, второй и третий годы зарастания соответственно, а затраты тепла на суммарное испарение (также, как и суммарное испарение) ниже на 37%, 28% и 23%. В структуре теплового баланса затраты тепла на суммарное испарение за вегетационный период превышают поток явного тепла и являются наибольшей расходной компонентой теплового баланса как сплошной вырубки, так и ненарушенного (условно) неморального ельника в условиях южной тайги ЕТР. Средняя за период (06.05 – 18.10) величина отношения Боуэна (отношения потока явного тепла к затратам тепла на суммарное испарение) в неморальном ельнике изменялась от 0.41 до 0.50, а на сплошной вырубке от 0.30 до 0.53.

3. В первые годы зарастания, экосистема сплошной вырубки в условиях южной тайги ЕТР является источником  $\text{CO}_2$  для атмосферы. За рассматриваемый период (06.05 – 18.10) суммы чистого экосистемного обмена составили  $553 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}$  в первый год зарастания,  $197 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}$  — во второй и  $453 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}$  — в третий. Полученные оценки отношения сумм валовой первичной продукции к экосистемному дыханию ( $GPP/TER$ ) для сплошной вырубки в южной тайге ЕТР соответствуют диапазону изменчивости данного показателя для сплошных вырубок, расположенных в условиях хвойных и широколиственных лесов Северной Америки, Европы и Азии. Средняя величина отношения  $GPP/TER$  для периода (06.05 – 18.10) на сплошной вырубке в условиях южной тайги ЕТР составило 0.58 в первый год зарастания, 0.84 – во второй и 0.76 — в третий, а в неморальном ельнике соответственно 0.98, 1.01 и 1.14. По данным литературных источников отношение  $GPP/TER$  на сплошных вырубках первых трёх лет зарастания может изменяться от 0.1 до 0.9.

4. Вырубка леса в условиях южной тайги ЕТР не приводит к изменению преобладающих факторов внешней среды, оказывающих влияние на величину суммарного испарения. Влияние аэродинамических факторов на величину

суммарного испарения больше, чем радиационных как в неморальном ельнике, так и на сплошной вырубке. Вырубка приводит к увеличению эффективности использования воды при фотосинтезе ( $WUE$ ) в вегетационный период и увеличению коэффициента эффективности использования света при фотосинтезе в летние месяцы. Средняя величина  $WUE$  на сплошной вырубке составила  $3.15 \text{ гС}\cdot\text{мм}^{-1}$  в первый год зарастания,  $3.78 \text{ гС}\cdot\text{мм}^{-1}$  во второй и  $4.30 \text{ гС}\cdot\text{мм}^{-1}$  в третий, а в неморальном ельнике соответственно  $3.07$ ,  $3.26$  и  $3.37 \text{ гС}\cdot\text{мм}^{-1}$ .

Таким образом, в рамках настоящего исследования впервые для южной тайги ЕТР на основе экспериментальных наблюдений за экосистемными потоками тепла, влаги и  $\text{CO}_2$  были получены оценки трансформации климаторегулирующих функций лесных экосистем в результате вырубки. Показано, что сплошная вырубка в условиях южной тайги ЕТР приводит к существенным изменениям ЭМО ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ) на уровне экосистемы.

Результаты настоящего исследования могут быть использованы для уточнения региональных оценок теплового, водного и углеродного баланса южно-таёжных лесов ЕТР с учётом антропогенного воздействия, а также для уточнения параметров и верификации современных моделей, описывающих процессы переноса энергии и вещества в системе «почва — растительность — атмосфера».

Учитывая недостаток экспериментальных данных об ЭМО нарушенных лесных экосистем на территории России для исследования влияния пространственной неоднородности абиотических и биотических факторов, специфики антропогенных нарушений на динамику и масштабы изменчивости экосистемных потоков тепла, влаги и диоксида углерода необходимо расширение экспериментальных эколого-климатических наблюдений на территории РФ.

## Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

### Статьи в научных журналах, рекомендуемых ВАК:

1. **Mamkin V.**, Kurbatova J., Avilov V., Mukhartova Yu., Krupenko A., Ivanov D., Levashova N., Olchev A. Changes in net ecosystem exchange of CO<sub>2</sub>, latent and sensible heat fluxes in a recently clear-cut spruce forest in western Russia: results from an experimental and modeling analysis // *Environmental Research Letters*. — 2016. — Vol. 11, no. 12. — P. 125012–125012.
2. Kuricheva O., **Mamkin V.**, Sandler'sky R., Puzachenko J., Varlagin A., Kurbatova J. Radiative entropy production along the paludification gradient in the southern taiga // *Entropy*. — 2017. — Vol. 19, no. 1. — P. 43.
3. **Мамкин В.В.**, Авилов В. К., Иванов Д. Г., Ольчев А. В., Курбатова Ю. А. Потоки CO<sub>2</sub> на сплошной вырубке в южной тайге европейской территории России // *Сибирский экологический журнал*. — 2019. — № 5. — С. 598–611.
4. **Mamkin V.**, Kurbatova J., Avilov V., Ivanov D., Kuricheva O., Varlagin A., Yaseneva I., Olchev A. Energy and CO<sub>2</sub> exchange in an undisturbed spruce forest and clear-cut in the southern taiga // *Agricultural and Forest Meteorology*. — 2019. — Vol. 265. — P. 252–268.
5. **Mamkin V.V.**, Mukhartova Y. V., Diachenko M. S., Kurbatova J. A. Three-year variability of energy and carbon dioxide fluxes at clear-cut forest site in the European southern taiga // *Geography, environment, sustainability*. — 2019. — Vol. 12, no. 2. — P. 197–212.
6. Mukhartova Y.V., Dyachenko M. S., Mangura P. A., **Mamkin V. V.**, Kurbatova J. A., Olchev. A. V. Application of a three-dimensional model to assess the effect of clear-cutting on carbon dioxide exchange at the soil - vegetation - atmosphere interface // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. — 2019. — Vol. 368. — P. 012036

**Публикации в других изданиях и сборниках материалов конференций:**

1. Курбатова Ю.А., Варлагин А. В., Авиллов В. К., Иванов Д. Г., Куричева О. А., **Мамкин В. В.**, Широная И. И. Стационарные наблюдения за энерго- и массообменом с атмосферой в природных экосистемах на базе эколого-климатических станций (eddy covariance towers): опыт исследований в Центрально-Лесном заповеднике // Стационарные экологические исследования: опыт, цели, методология, проблемы организации. — ООО "Товарищество научных изданий КМК", М., 2016. — С. 89–93.
2. Курбатова Ю.А., Авиллов В. К., Иванов Д. Г., Куричева О. А., Варлагин А. В., **Мамкин В. В.** Мониторинг биогеохимических циклов в южно-таежных экосистемах Европейской части РФ // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития. — ФГБУ ИГКЭ Росгидромета и РАН ФГБУ ИГКЭ Росгидромета и РАН, М., 2017. — С. 132–132.
3. **Мамкин В.В.**, Авиллов В. К., Байбар А. С., Иванов Д. Г., Ольчев А. В., Курбатова Ю. А. Результаты мониторинга потоков тепла, влаги и CO<sub>2</sub> на сплошной вырубке в юго-западной части Валдайской возвышенности // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития. — ФГБУ ИГКЭ Росгидромета и РАН ФГБУ ИГКЭ Росгидромета и РАН, М., 2017. — С. 130–131.
4. **Мамкин В.В.**, Авиллов В. К., Байбар А. С., Иванов Д. Г., Курбатова Ю. А., Ольчев А. В. Результаты мониторинга потоков тепла, влаги и CO<sub>2</sub> на сплошной вырубке в охранной зоне ЦЛГПБЗ // Вклад заповедной системы в сохранение биоразнообразия и устойчивое развитие: Мат-лы Всеросс. науч. конференции (с международ. участием), посвящ. 85-летию орг-ции Центрально-Лесного гос. природ. биосфер. зап-ка и 100-летию заповедной системы России. — ООО "Великолукская Городская Типография" Псковская обл., Великие Луки, 2017. — С. 338–341.
5. **Мамкин В. В.** Потоки тепла и CO<sub>2</sub> на сплошной вырубке в южной тайге Европейской части РФ // Материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых Теория и практика

современных географических исследований в рамках XIII Большого географического фестиваля. — Свое издательство, СПб., 2017. — С. 276–279.

6. **Мамкин В.В.**, Авилов В. К., Байбар А. С., Иванов Д. Г., Ольчев А. В., Курбатова Ю. А. Энерго-массообмен с атмосферой сплошной вырубке в подзоне южной тайги Европейской части РФ: результаты измерений // Бореальные леса: состояние, динамика, экосистемные услуги: Тезисы докладов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 60-летию Института леса Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, 11–15 сентября 2017 года). — Карельский научный центр РАН, Петрозаводск, 2017. — С. 174–176.

7. Ольчев А.В., Авилов В.К., Байбар А.С., Белотелов Н.В., Болондинский В.К., Иванов Д.Г., Кузьмина Е.В., Курбатова Ю.А., Левашова Н.Т., **Мамкин В.В.**, Мангура П.А., Молчанов А.Г., Мухартова Ю.В., Никитин М.А., Новенко Е.Ю., Придача В.Б., Ривин Г.С., Розинкина И.А., Сазонова Т.А., Сандлерский Р.Б., Суркова Г.В., Холопцева Е.С. Леса Европейской территории России в условиях меняющегося климата. — М.: Товарищество научных изданий КМК, 2017. — 276 с.

8. Ольчев А.В., **Мамкин В.В.**, Авилов В.К., Байбар А.С., Иванов Д.Г., Курбатова Ю.А. Сезонная динамика потоков CO<sub>2</sub>, явного и скрытого тепла на свежей сплошной вырубке в южно-таежной зоне европейской части России // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. — 2017. — Т. 28, — № 4. — С. 5-23.

9. **Mamkin V.**, Kurbatova J., Avilov V., Mukhartova Y., Krupenko A., Ivanov D., Levashova N., Olchev A. CO<sub>2</sub> and heat fluxes in a recently clear-cut spruce forest in European Russia: experimental and modeling studies // Geophysical Research Abstracts. — Vol. 19 — EGU2017-9319-3

10. **Mamkin V.**, Kurbatova J., Avilov V., Ivanov D., Olchev A. Energy and CO<sub>2</sub> fluxes in a recently clear-cut spruce forest in southern European taiga // Proceedings of the 3rd Pan-Eurasian Experiment (PEEX) Conference and the 7th PEEX Meeting / Ed. by H. Lappalainen. — Helsinki, 2017. — Vol. 201 of Report series in Aerosol Science. — P. 312–314.

11. **Мамкин В.В.**, Курбатова Ю. А., Авилов В. К., Иванов Д. Г., Варлагин А. В., Ольчев А. В. Потоки тепла и CO<sub>2</sub> в ненарушенном ельнике и на сплошной вырубке в южной тайге Европейской территории России / Научные основы

устойчивого управления лесами: Материалы Всероссийской научной конференции. — ЦЭПЛ РАН Москва, 2018. — С. 207–208.

12. **Mamkin V.**, Avilov V., Ivanov D., Kuricheva O., Olchev A., Varlagin A., Yaseneva I., Kurbatova Y. Energy and carbon dioxide fluxes in clear-cut and undisturbed boreal forests in Russia // Geophysical Research Abstracts, 2018. — Vol. 20 — EGU2018–4611–1.

13. **Mamkin V.**, Avilov V., Ivanov D., Kuricheva O., Olchev A., Varlagin A., Yaseneva I., Kurbatova J. Energy and CO<sub>2</sub> fluxes over undisturbed mature spruce forest and clear-cut in west part of Russia // Practical Geography and XXI Century Challenges. International Geographical Union Thematic Conference dedicated to the Centennial of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, 4–6 June 2018, Moscow. Conference Book / Ed. by S. V. Ivanov, A. B. Sebentsov, S. B. Suslova — Vol. 1. — Moscow, 2018. — P. 132–133.

14. **Mamkin V.**, Olchev A., Varlagin A., Kurbatova J. Energy and CO<sub>2</sub> fluxes over clear-cut and undisturbed mature spruce forest ecosystems in west part of Russia // AGU 2018 Fall Meeting proceedings. — Washington, 2018. — GC33E–1404.

15. Курбатова Ю.А., Варлагин А. В., **Мамкин В. В.**, Авилов В. К., Иванов Д. Г. Мониторинг экосистемных потоков тепла, влаги и CO<sub>2</sub> в южно-таежных экосистемах Европейской части РФ // Лесные экосистемы бореальной зоны: биоразнообразие, биоэкономика, экологические риски. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Красноярск, 26–31 августа 2019 г. — ИЛ СО РАН Красноярск, 2019. — С. 241–242.

16. **Мамкин В.В.**, Авилов В. К., Варлагин А. В., Ольчев А. В., Курбатова Ю. А. Потоки тепла, влаги и CO<sub>2</sub> на сплошной вырубке в европейской южной тайге: результаты 3-летнего мониторинга методом турбулентных пульсаций // Лесные экосистемы бореальной зоны: биоразнообразие, биоэкономика, экологические риски. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Красноярск, 26–31 августа 2019 г. — ИЛ СО РАН Красноярск, 2019. — С. 263–265.

17. Olchev A., **Mamkin V.**, Rozinkina I., Mukhartova Y., Nikitin M., Tatarinovich E., Kurbatova J. Effects of deforestation of boreal forests on atmospheric fluxes and weather conditions at the local and regional scales // Abstracts of Japan

Geoscience Union Meeting 2019, Makuhari Messe, Chiba, Japan, 26-30 May 2019. — Tokyo, Japan, Japan Geoscience Union, 2019. — MIS01–04.

18. **Мамкин В. В.**, Варлагин А.В., Курбатова Ю. А. Влияние вырубки на тепловой баланс лесной экосистемы // Труды Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника. Выпуск 7. — М.: Товарищество научных изданий КМК, 2020. — С.98–112.

19. **Мамкин В. В.**, Курбатова Ю. А. Современные изменения климата на юго-западе Валдайской возвышенности // Летопись природы: фенология, отклики биоты на изменение климата. Материалы II Международной научной конференции в Центрально-Лесном государственном природном биосферном заповеднике 10–14 августа 2020 г. — М.: Товарищество научных изданий КМК, 2020. — С. 46–51.

20. **Mamkin V.**, Varlagin A., Kurbatova J. Ecosystem CO<sub>2</sub> fluxes in an undisturbed mature spruce forest and adjacent clear-cut in southern taiga of European Russia // ICOS Science Conference 2020 Book of Abstracts. — 2020. — P. 122–123.