



Исследования продуктивности и углеродного баланса лесов Карелии: история и перспективы

Крышень А.М., Мошников С.А., Галибина Н.А., Мамай А.В., Мошкина Е.В.,
Придача В. Б., Ромашкин И.В.

Институт леса КарНЦ РАН





В Институте леса исследования продуктивности лесов носили комплексный характер

Под руководством член-корреспондента ВАСХНИЛ Николая Ивановича КАЗИМИРОВА в ИЛ КарНЦ РАН выполнялись комплексные исследования продуктивности лесов, составлялись математические модели роста насаждений в различных экологических условиях. Результаты этих исследований не потеряли своей актуальности и по сей день.



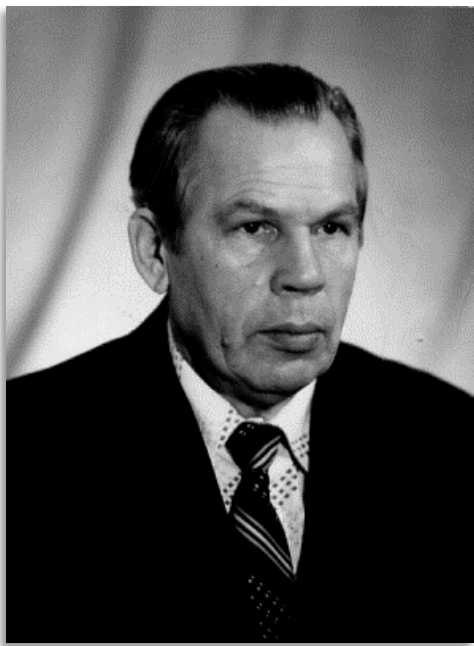
1973



1977

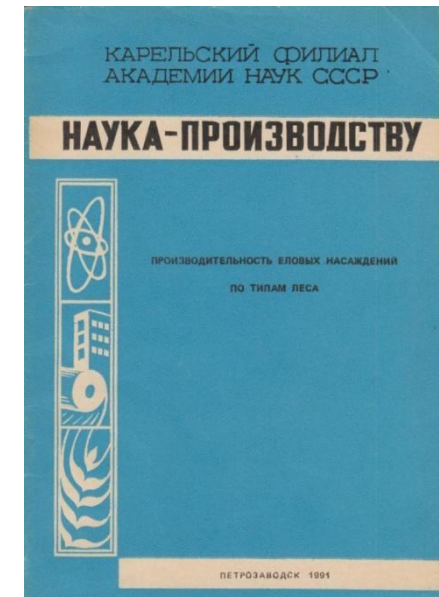
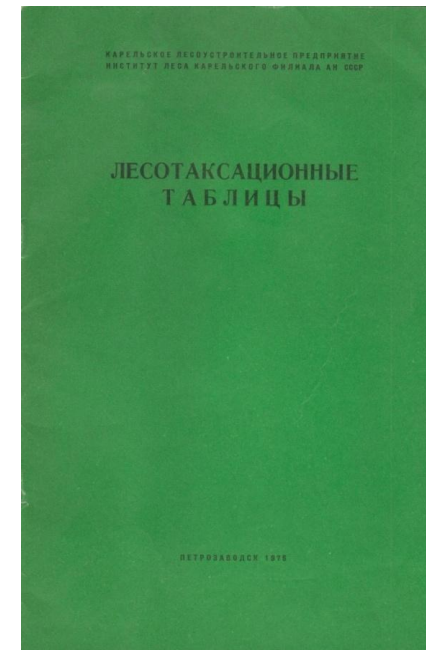
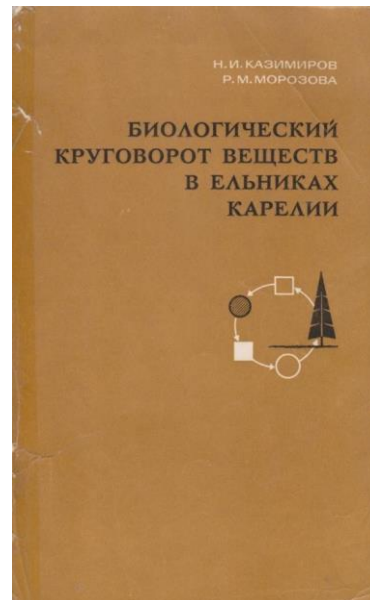
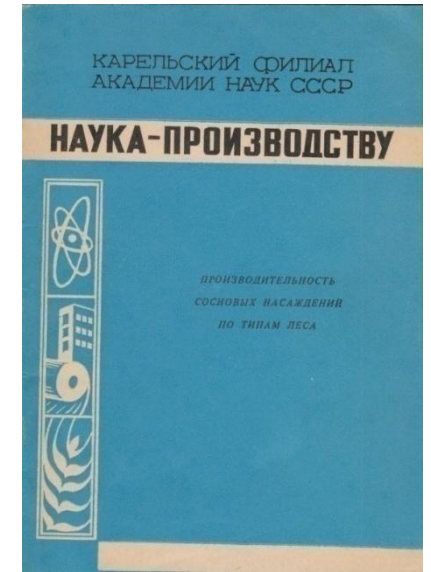
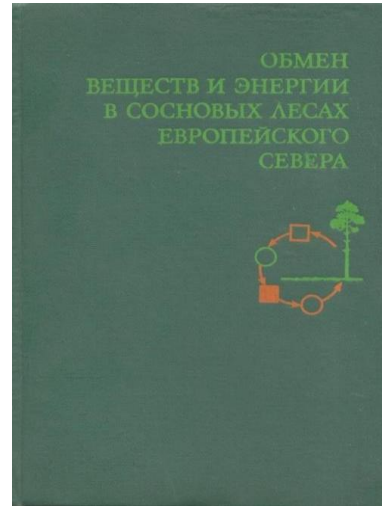


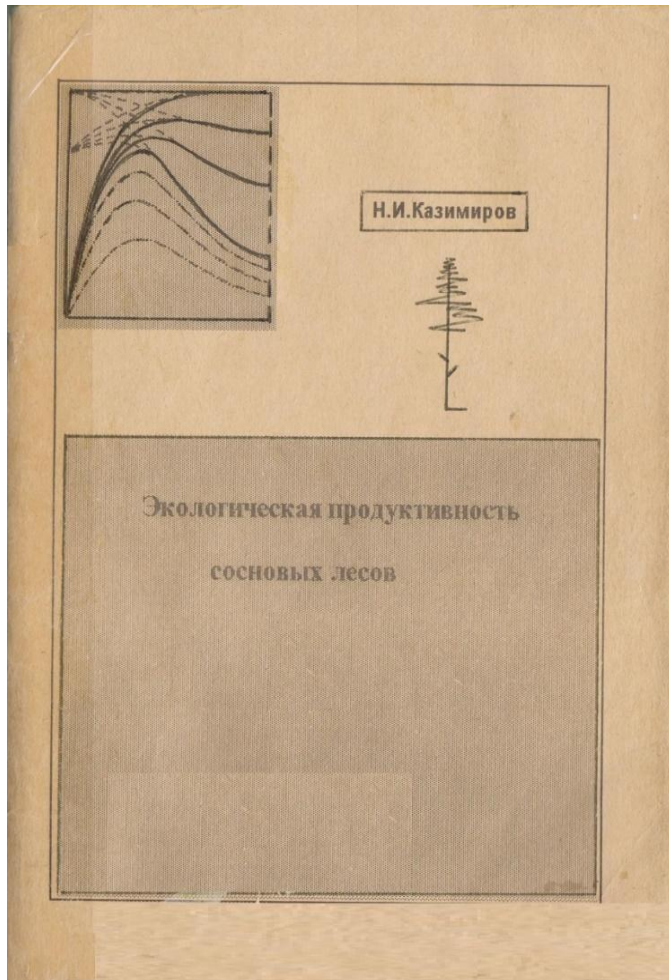
1978



Н.И. Казимиров (1924-1995)

Изучал структуру еловых, сосновых и березовых насаждений, обмен веществ, энергии экосистем, минеральное и водное питание древесных растений. Один из крупнейших исследователей вопросов биологической продуктивности лесов северо-запада СССР. В 1978-1989 гг. организовал ряд экспедиций по европейской части СССР (от Мурманской до Херсонской обл.) для изучения влияния почвенно-климатических условий на продуктивность хвойных.





- В 1995 г. была опубликована последняя работа Николая Ивановича - монография «Экологическая продуктивность сосновых лесов».
- В монографии описаны методика сбора и обработки материалов, полученные результаты сведены в таблицы и десятки математических моделей для расчета различных фракций фитомассы (стволовой древесины, корней, ветвей, коры, хвои и т.д.) в зависимости от климатических условий, плодородия и механического состава почв, увлажнения и т.д.

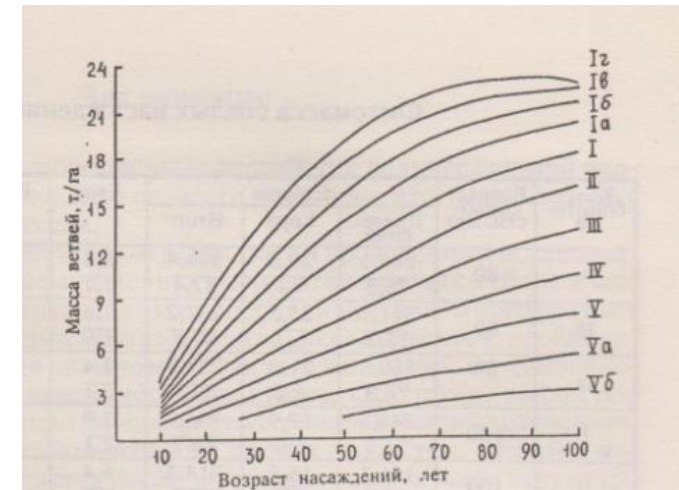


Рис. 34. Масса ветвей в насаждениях по классам бонитета

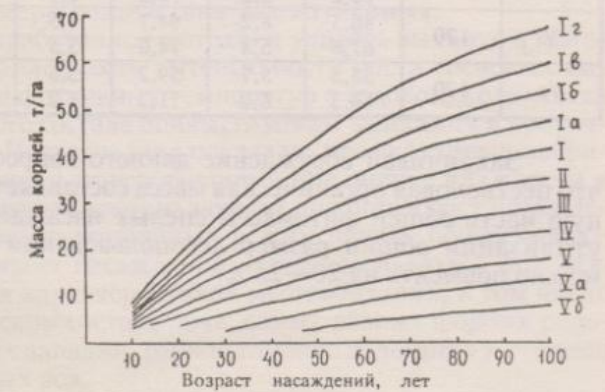
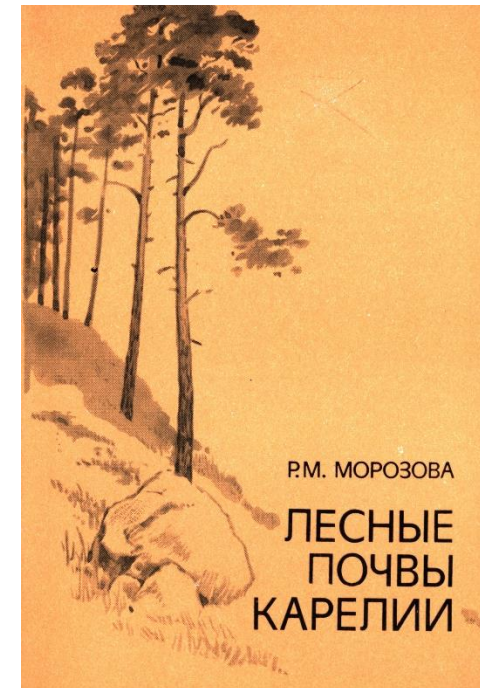
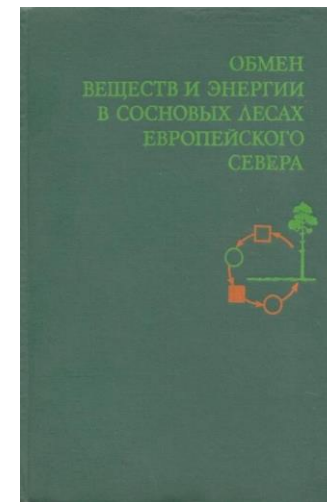
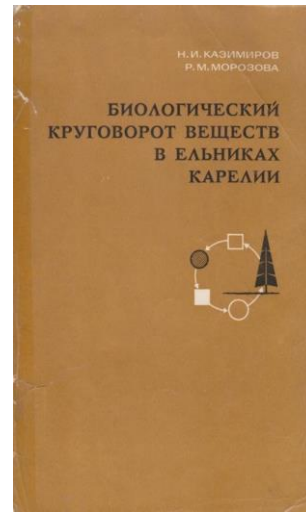
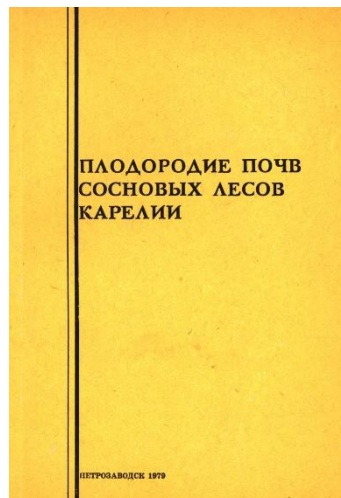


Рис. 35. Масса корней в насаждениях по классам бонитета



Р.М. Морозова 1928-2018

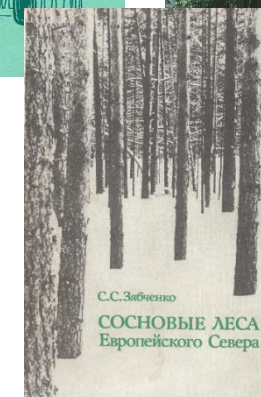
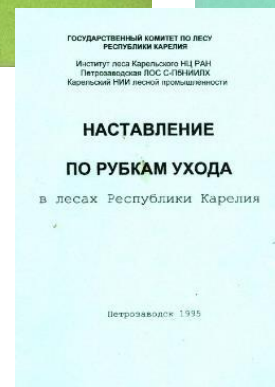
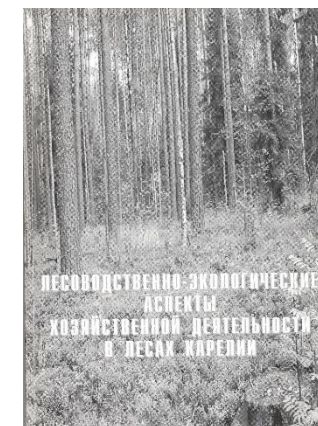
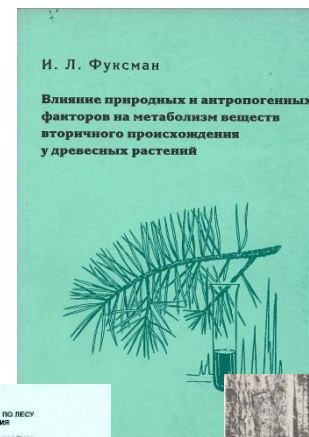
Исследовала химический состав почв под сосновыми и еловыми древостоями различного возраста и продуктивности, климатические и сезонные особенности запасов углерода, азота и зольных элементов почвы. Совместно с Н.И. Казимировым изучала запасы и динамику углерода в лесных биогеоценозах Карелии. Кроме того, Р.М. Морозова (1985) оценила влияние различных видов рубок на почву. Она обнаружила снижение содержания органического вещества почв и основных элементов питания в результате сплошных рубок. Значительно меньшим воздействием характеризовались постепенные и выборочные рубки. Вызванное ими увеличение поступления растительных остатков на поверхность почвы привело к некоторому накоплению органического вещества в подстилке и почве.





Мониторинг таежных лесов и экологической ситуации в Карелии

По инициативе С.С. Зябченко Институт леса организовал комплексные работы по организации мониторинга коренных и антропогенно трансформированных лесов. В этой работе принимали участие сотрудники большинства лабораторий Института. Координировали работу С.С. Зябченко и В.В. Дьяконов. Исследования активно продолжаются и сейчас, в ИЛ зарегистрирована база постоянных опытных объектов превышающая 300, которая ежегодно пополняется новыми объектами.





А.А. Иванчиков, С.С. Зябченко изучали структуру фитомассы сосняков Карелии в зависимости от возраста и типа леса. **А.А. Кучко** исследовал особенности формирования фитомассы насаждений с преобладанием в составе березы. **Н.Л. Зайцева и Т.В. Белоногова** изучали возрастную динамику фитомассы живого напочвенного покрова в сосновых и еловых насаждениях Карелии и влияние на ее структуру различных хозяйственных мероприятий. **В.М. Медведева, В.А. Матюшкин** исследовали структуру и динамику органического вещества биогеоценозов на торфяных почвах и влияние на них гидролесомелиорации. **Л.К. Кайбияйнен** с соавторами изучал особенности CO_2 -газообмена хвойных





Запасы углерода территории



М.Ф. Макаревский
1985 год

Одним из первых в России комплексную оценку запасов органического углерода в основных компонентах биогеоценозов (на примере Карелии) провел М.Ф. Макаревский («Экология», 1991, № 3). Оригинальность идеи заключалась в попытке не только определить общий запас углерода лесных и болотных биогеоценозов республики, но и оценить углеродный баланс территории с учетом интенсивности объемов лесозаготовки, эффективности использования древесного сырья, гидролесомелиорации и т.д..

УДК 551.588.6 : 581.132(470.22)

ЗАПАСЫ И БАЛАНС ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ЛЕСНЫХ И БОЛОТНЫХ БИОГЕОЦЕНОЗАХ КАРЕЛИИ

М. Ф. Макаревский

По данным учета лесного фонда, лесоведческих и почвоведческих исследований, динамики лесозаготовок и лесосушительной мелиорации рассчитаны запасы и баланс органического углерода в лесных и болотных биогеоценозах Карелии. Запас углерода в лесных экосистемах равен 1,13 млрд. т (128,3 т/га), в болотных — 3,74 млрд. т (1030,0 т/га). В обоих случаях большая часть запаса находится в почве. Баланс углерода в лесных биогеоценозах в настоящее время отрицателен (—2,34 млн. т), в болотных — положителен (+0,88 млн. т).

В последние годы все большее беспокойство ученых вызывает рост содержания в атмосфере углекислого газа. Антропогенная природа этих изменений, в частности роль CO_2 , высвобождаемого при сжигании ископаемого топлива, несомненна. Значение для глобального баланса углерода жизнедеятельности биосферы однозначной оценки пока не получило. В частности, Дж. Вудвелл с соавторами (Woodwell et al., 1978) считают, что биосфера в настоящее время является источником углерода, ежегодно выделяющим в атмосферу от 2 до 18 млрд. т. По мнению К. И. Кобак с соавторами (1980), биогенное связывание атмосферного углерода превышает его поступление в результате дыхания живых организмов и разложения органики.

Такие расхождения обусловлены тем, что расчеты глобального баланса в значительной степени основаны на допущениях и экспертных оценках. Поэтому необходимой частью исследований глобального баланса углерода должно стать составление региональных балансов, опирающихся на более точные данные конкретных экспериментальных работ. Такие региональные балансы углерода могут оказаться полезными и для разработки экологически обоснованной стратегии природопользования, поскольку большинство хозяйственных решений разрабатывается и реализуется на уровне региона.

Цель настоящей работы — расчет запасов и баланса органического углерода в основных типах биогеоценозов таежной зоны (лесных и болотных) на территории Карельской АССР.

Согласно данным учета лесного фонда Карелии на 1.01.1983 г., леса занимают площадь 8816,3 тыс. га, запас древесины в них 781,27 млн. м³. Поскольку древостой различных возрастных и породных групп заметно различаются по величине запаса древесины на единицу площади, структуре фитомассы, интенсивности биологического круговорота веществ, расчет выполнен раздельно по девяти основным породно-возрастным группам. Распределение площади и запасов древостоев по этим группам приведено в табл. 1.

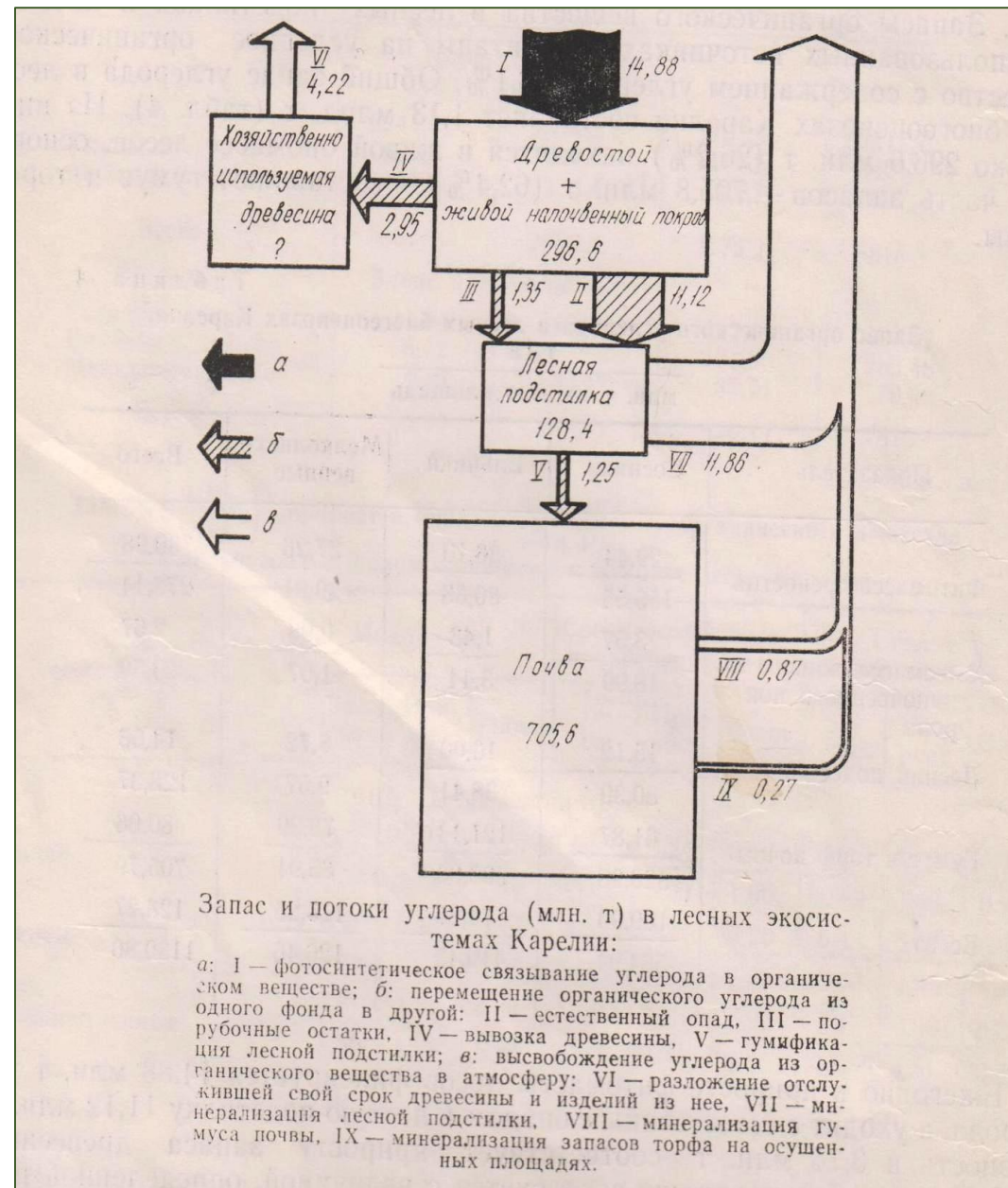
Как показал анализ, большинство экспериментальных исследований продуктивности лесов выполнено на участках с характеристиками (в частности, запасом древесины и величиной прироста), превышающими среднерегиональные, иногда в 2—3 раза. Прямое использование этих данных для определения общих запасов органического вещества в древостоях (путем умножения показателей модельных участков на площадь, занятую соответствующими типами леса) приводит к получению завышенных результатов. Поэтому мы предлагаем другой метод определения средних запасов органического вещества в древостоях. По данным, полученным на модельных участках, рассчитываются переводные коэффициенты, характеризующие связь между величинами запасов древесины и органического вещества (табл. 2). Средние запасы древесины в разных типах лесов определяются по данным учета лесного фонда, т.е. массового обследования лесных площадей. Представленные в табл. 2 значения запасов, прироста и опада органического веще-



Выводы из работы М.Ф. Макаревского

Макаревский установил, что в лесных биogeоценозах Карелии (по состоянию на 1991 г.) сосредоточено около 1,1 млрд. тонн углерода, в болотных – 3,74 млрд т, 99% последнего хранится в торфе. Углеродный баланс лесов – отрицательный, т.е. выделение превышает поглощение (-2,3 млн т). Это было обусловлено большими объемами рубок в 60-80 годах. Баланс болотных биogeоценозов – положителен (+0,8 млн т).

Ввиду сокращения объемов рубок в конце 80 годов, дефицит баланса углерода лесных биogeоценозов в ближайшие годы должен сократиться.





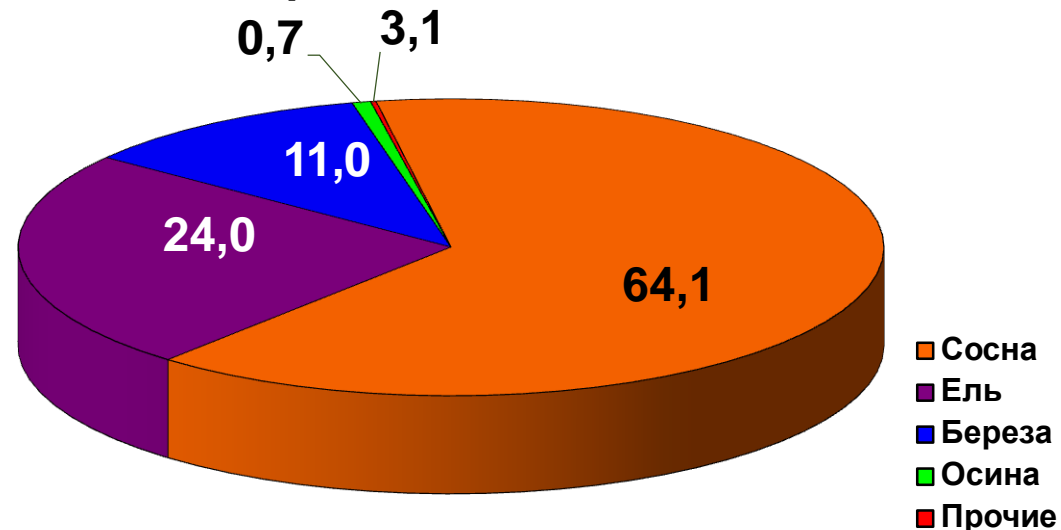
Распределение углерода фитомассы по преобладающим породам

Нами по состоянию на 01.01.2018 запас углерода в **фитомассе лесов** Карелии приводится около **365 млн тонн**. Основным резервуаром Сорг. являются сосновые леса, в них сосредоточена 56% общего запаса. Несколько меньше (около 30%) сосредоточено в ельниках. В лесах с преобладанием лиственных пород зафиксировано около 14%.

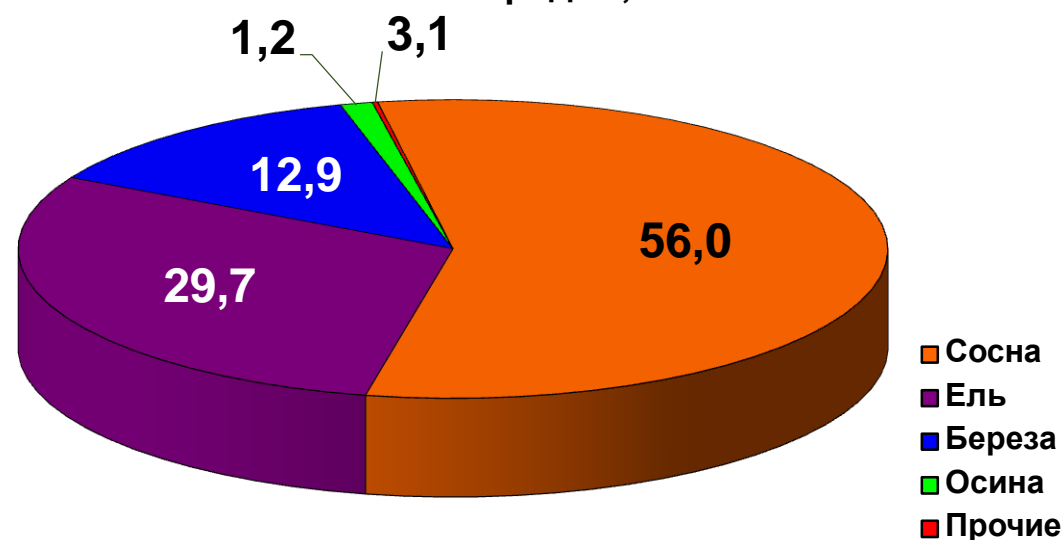
Проведен сравнительный анализ результатов (по региональным данным и методике ЦЭПЛ РАН (Д.Г. Замолодчиков)). Установлены некоторые различия по отдельным породам, группам возраста и компонентам. Однако отличия в окончательных результатах не очень существенны.

породам

Распределение площади лесов по породам, %



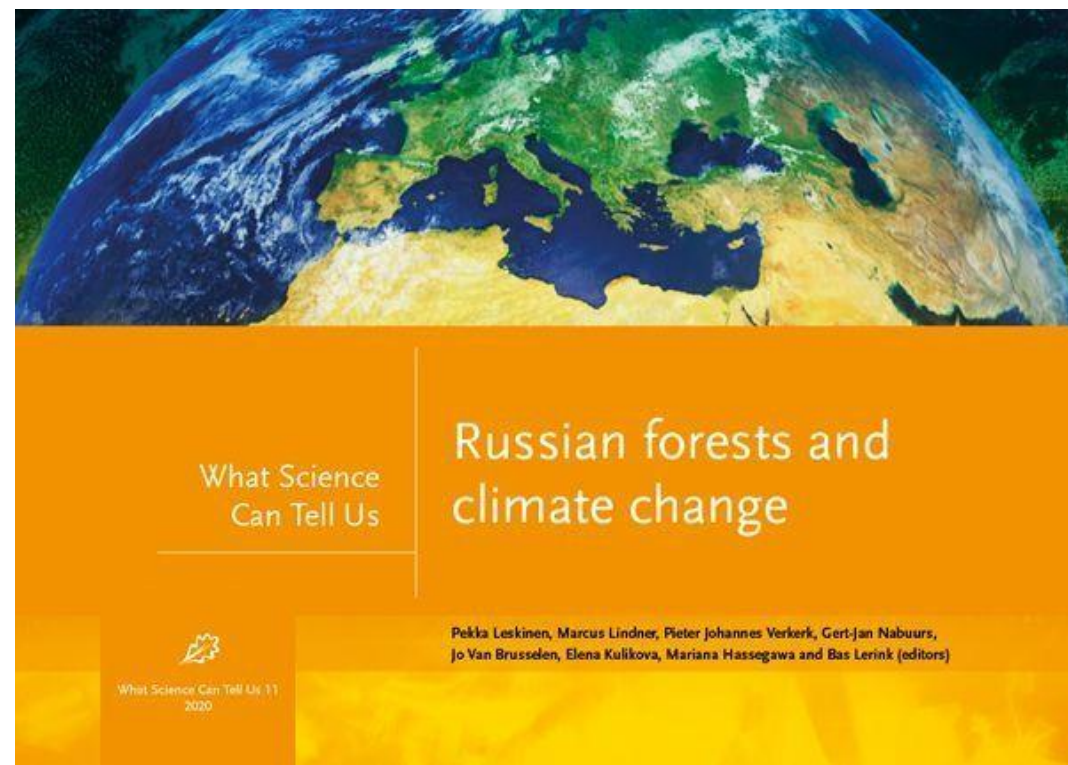
Распределение запаса углерода в фитомассе по породам, %





Russian forests and climate change (Rufoclim) Европейский институт леса, 2020

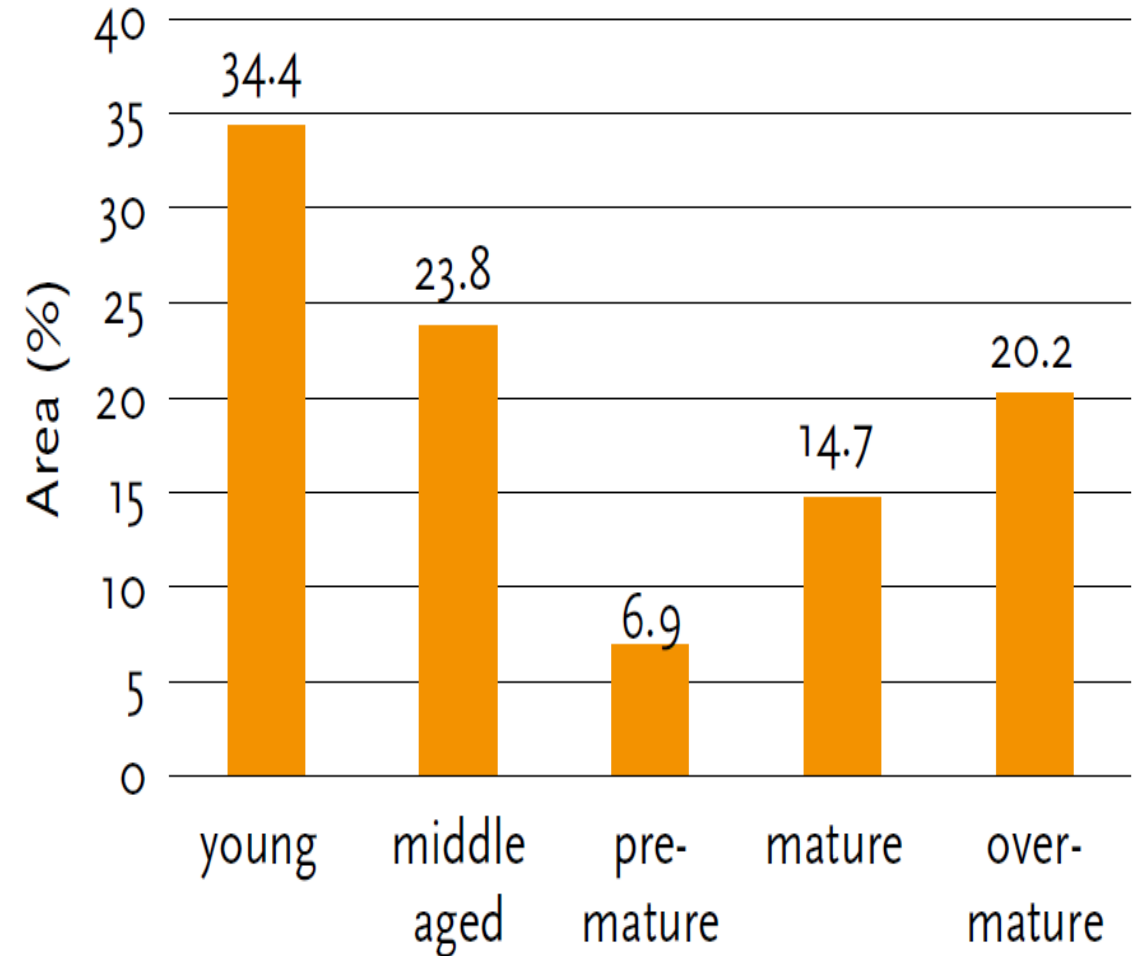
- Одно из направлений проекта – оценка (моделирование на основе EFISCEN) различных сценариев развития лесной отрасли в трех регионах России, в том числе Карелии.
- Основной вопрос: возможно ли совмещать развитие лесной промышленности с сохранением или даже усилением других экологических функций лесов, в первую очередь (исходя из задач проекта) – климаторегулирующей функции – поглощение CO₂?



Суть сценария BAU заключается в том, что существующие тенденции в основном сохраняются и никаких дополнительных усилий по изменению методов управления лесами в качестве мер по смягчению последствий изменения климата или для повышения климаторегулирующей функции и устойчивости карельских лесов не предпринимается. В частности, предполагается следующее:

- Объем заготовки древесины будет следовать среднему росту, характерному для периода с 2007 по 2022 год, в течение следующих 50 лет (т. е. продолжение тенденции) и после этого стабилизируется (т. е. увеличится с нынешних 7,2 млн м³/год до 12,7 млн м³/год через 50 лет).
- **Доля рубок ухода в общем объеме заготовки древесины (7 %) останется неизменной.**
- Текущая эффективность лесозаготовительных работ (вывозится 85% от объема всей заготовленной древесины) останется постоянной.
- Текущая тенденция естественного возобновления осиной на части площадей сплошных рубок в сосновых и еловых лесах сохраняется. Предполагается, что в южной части республики после сплошных рубок в сосновых и еловых лесах 30% площадей вырубок естественным образом возобновляются осиной.

Business as usual (BAU):



Возрастная структура лесов Карелии

Сценарий CSF1

Предполагается, что **объем заготовок будет стабильно расти, но немного быстрее, чем в сценарии ОХД, достигнув 14,4 млн м³/год через 50 лет.**

Предполагается, что **эффективность лесозаготовительных работ повысится (соотношение вывозки древесины с лесосек от объемов заготовки увеличено до 90 %).**

Предполагается, что доля рубок ухода в общем объеме вывозки древесины увеличится до 50 %.

Вырубки после лесозаготовок в лесах с преобладанием сосны, ели и березы восстанавливаются с использованием улучшенного селекционного материала тех же пород.

Вся дополнительно заготовленная древесина направляется непосредственно на глубокую переработку, к примеру производство текстиля на основе древесины.

Сценарий CSF2

Основная цель CSF2 — защитить и сохранить старовозрастные леса на всей территории
заготовка древесины в защитных лесах снижена с 36 % от общего объема рубок до 18 %. Древесина, ранее заготавливаемая в защитных лесах, замещается древесиной из эксплуатационных лесов, но ее общий объем составляет 12,7 млн м³/год как в сценарии ОХД.

- Леса после заготовки восстанавливаются с теми же породами и той же продуктивности, что и в предыдущем сценарии.
- Другие виды деятельности и общий объем необходимых рубок такие же, как и в сценарии ОХД.

Сценарий CSF3

Здесь основная задача состоит в том, чтобы сосредоточиться на накоплении углерода в лесах подзоны северной тайги и защитных лесах, но при том же общем объеме заготовки древесины. Поэтому леса в подзоне средней тайги используются более интенсивно.

Другие виды деятельности те же, что и в сценарии CSF1.



Европейская лесная информационная модель SCENario (EFISCEN) (Sallnäs, 1990; European Forest Institute, 2016; Verkerk et al., 2017).

В модели были использованы данные ГЛР в качестве основного источника вводных данных. На основе этой информации модель может спрогнозировать динамику лесных ресурсов в зависимости от особенностей структуры лесов и управления (например, лесовосстановление, рубки ухода, рубки главного пользования), а также изменения площади лесов.

Период моделирования - 50 лет.

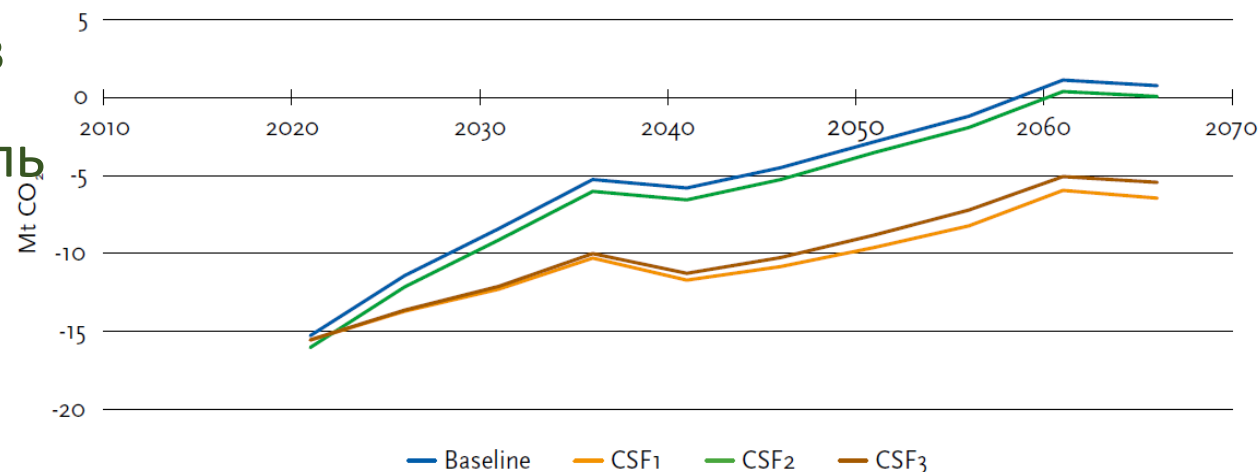


Figure 23. Carbon balance in living biomass for the BAU and the CSF scenarios in Karelia. Positive values are emissions and negative values are removals of CO₂.

Согласно прогнозам, леса Карелии будут обеспечивать сток углерода в течение всего периода по сценариям CSF1 и 3, в то время как в сценариях BAU и CSF2 они превратятся в источник углерода около 2060 года. Увеличение доли рубок ухода и применение улучшенного селекционного материала в сценариях CSF 1 и 3 поддерживают состояние лесного покрова и стимулируют годовой прирост древесины, достаточный для компенсации увеличившегося потребления (по сравнению со сценарием BAU).



Что продемонстрировали результаты RUFOSLIM?

- В целом результаты продемонстрировали возможность интенсификации лесопользования с увеличением заготовки древесины, сохраняя при этом климаторегулирующую функцию эксплуатационных лесов.
- Это возможно только при эффективном восстановлении лесов посадочным материалом с улучшенными генетическими свойствами и проведении ухода за культурами.
- Для проведения подобных оценок необходимо иметь полную и достоверную информацию о лесах, что, к сожалению, в настоящее время мы обеспечить не можем.
- Не учитывался почвенный пул углерода, отсюда ошибка в роли старовозрастных лесов и отрицательный результат по природоохранной (CSF2) модели.
- Недоступна информация об объемах выпускаемой продукции предприятиями лесного комплекса – невозможность точного расчета даже на современном этапе.



Углеродный баланс осушенных биогеоценозов

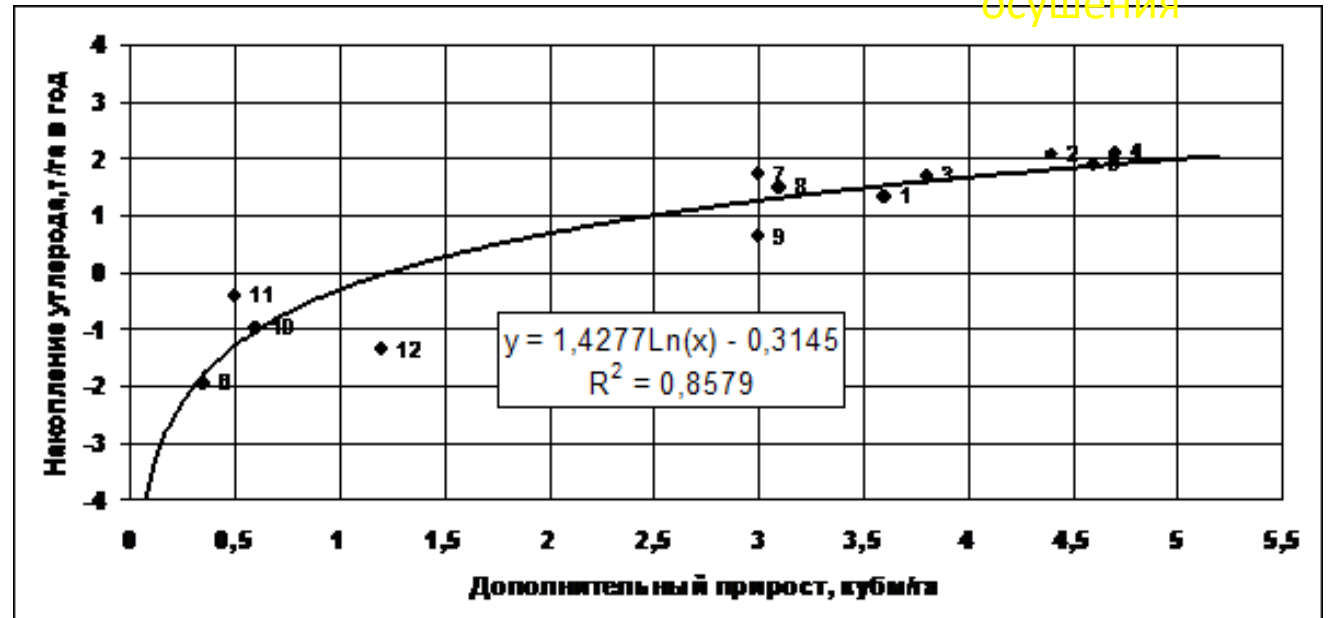
В.И. Саковцом (2000) установлено, что при дополнительном приросте от осушения $1,25 \text{ м}^3/\text{га}$ в год в условиях Карелии годовое накопление углерода равно нулю. При меньшем дополнительном приросте лесоболотный биогеоценоз после осушения превращается в источник углерода в атмосферу. При большей производительности древостоя биогеоценоз является его стоком



Сосняк травяно-сфагновый
спустя 40 лет после
осушения



Неосушенное болото





Оценка запасов КДО в лесах Карелии

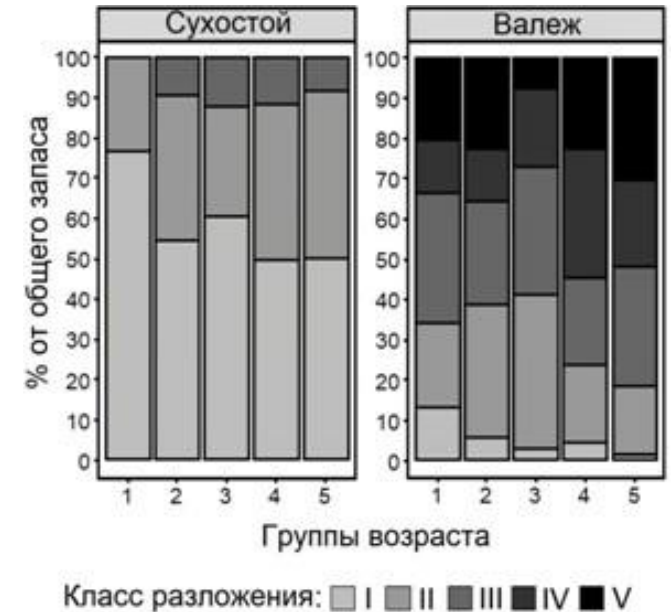
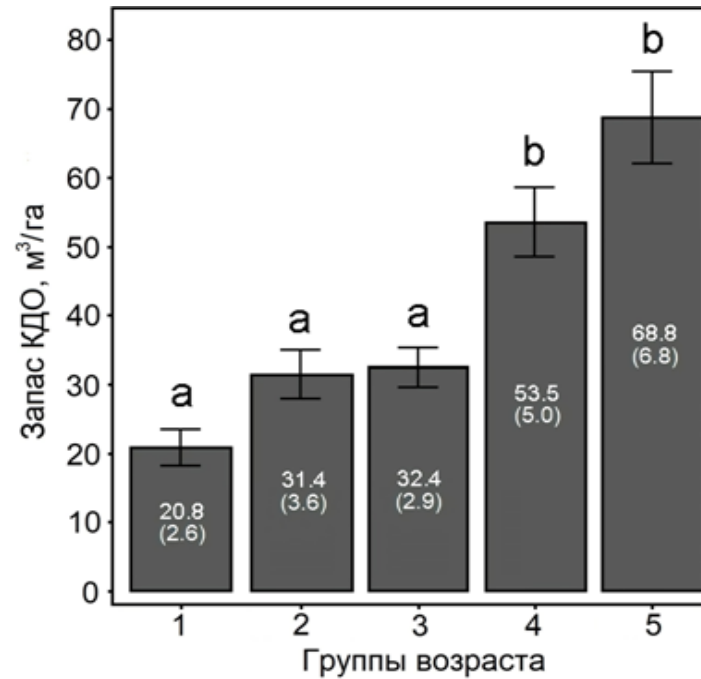
Проведена оценка запасов КДО и углерода в них в сосновых насаждениях средней тайги.

Установлено, что:

Запас крупных древесных остатков с возрастом увеличивается с 21 м³/га в молодняках до 69 м³/га в перестойных насаждениях, достигая в отдельных случаях почти 200 м³/га.

Степень деструкции древесины КДО с возрастом повышается. Это связано с постепенным замедлением скорости выбывания органического вещества древесины, обусловленным возрастным увеличением размеров стволов отпада

(Лесоведение, 2019; Экология, 2021)





Уникальные для тех лет (1970-1980 годы) исследования провел Л.К. Кайбияйнен совместно с финскими коллегами

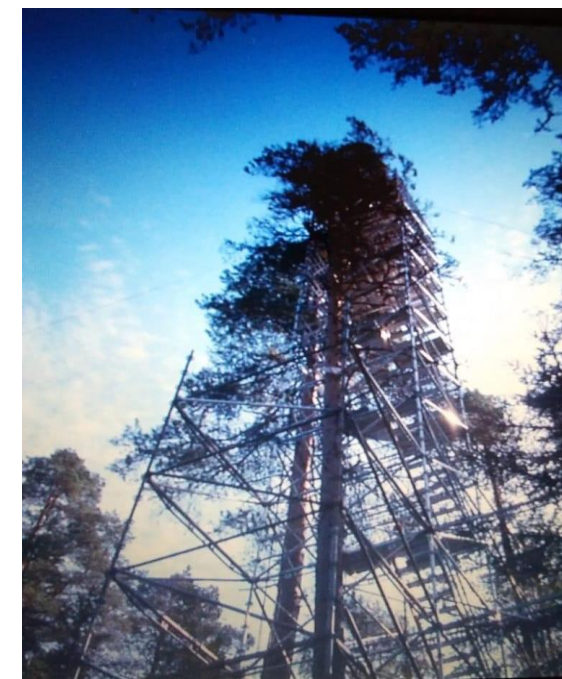


**Л.К. Кайбияйнен
1937-2004**

Под его руководством одним из первых в стране был создан лесной стационар и проведен эксперимент по регистрации основных процессов жизнедеятельности древесных растений (роста, фотосинтеза, транспирации, потоков влаги по ксилеме ствола) и факторов внешней среды (ФАР, температуры и относительной влажности воздуха, запасов влаги в почве).



**Л.К. Кайбияйнен с Н.И. Казимировым
на стационаре «Кончезеро»**





На примере среднетаежных сосновых лесов Карелии по результатам модельных экспериментов выполнена оценка отклика составляющих CO_2/H_2O -обмена лесных экосистем к прогнозируемым изменениям климата к концу XXI в.

Для анализа современного климата и его будущих изменений использовали модель для умеренного сценария эмиссии парниковых газов RCP4.5 (IPCC 2013).



В.Б. Придача с фотосинтетической система Li-Cor 6400XT

Современная и спрогнозированная на конец XXI века годовая изменчивость ряда параметров среднетаежного сосняка черничного по результатам модельных экспериментов MixFor-SVAT

Совтор: **А.В. Ольчев** (Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова)

	E (суммарное испарение)	TR (транспирация)	NEE (нетто CO_2 -обмен)	GPP (валовая первичная продукция)	NPP (нетто первичная продукция)	RE (дыхание экосистоем)
	(мм год ⁻¹)		(г С м ⁻² год ⁻¹)			
Современные условия	418.5	263.7	-312.9	1441.1	599.1	1128.2
Сценарий RCP4.5	437.6	247.3	-433.7	1895.2	787.8	1461.5



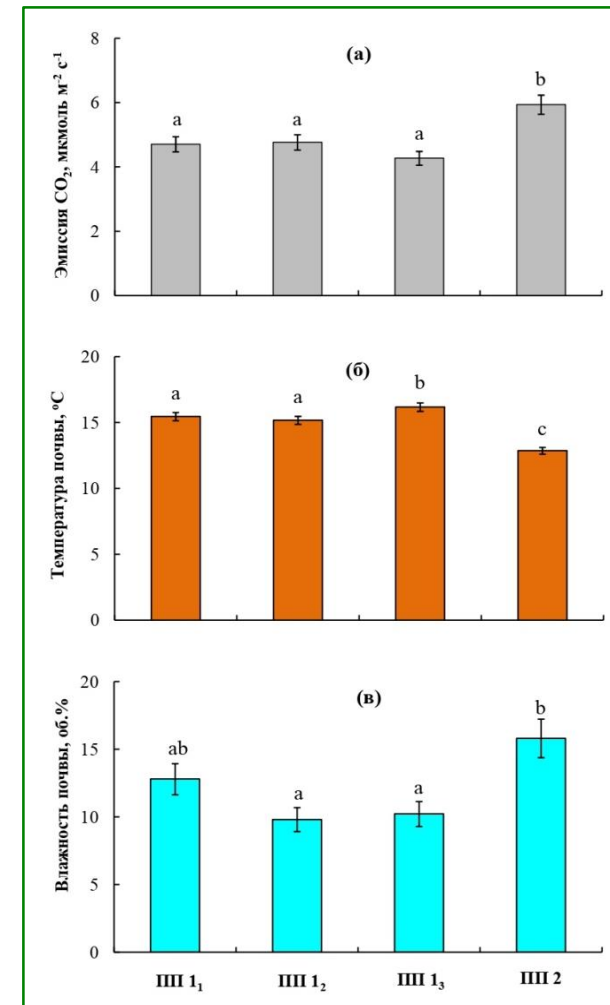
Влияние рубки древостоев на эмиссию CO₂

Оценено влияние сплошной рубки на составляющие углеродного баланса среднетаежного сосняка черничного. Почвенную эмиссию на вырубке исследовали с учетом микрогруппировок напочвенного покрова.



Среднедневные значения эмиссии CO₂ с поверхности почв (а), температуры (б) и объемной влажности (в) почв (слой 0–20 см) сплошной вырубki ПП 1 с учетом микрогруппировок напочвенного покрова (травянистая ПП 1₁, зеленомошная ПП 1₂, мелкие порубочные остатки ПП 1₃) и сосняка черничного ПП 2.

Различные строчные буквы (а, б) указывают на существенные различия средних при сравнении микрогруппировок экспериментальных участков ($p < 0.05$).





Перспективы развития исследований продуктивности и углеродного баланса лесов связаны с проектом «Разработка системы мониторинга бюджета углерода в лесах Восточной Фенноскандии» и организацией тестового полигона

методы

оценка вклада стволовой древесины (SW/HW) в аккумуляцию углерода

влияние фиксации растительного материала на содержание углерода

оценка стока углерода в корневые системы

Баланс углерода в лесной экосистеме

элементы

Древесный ярус

листва/ветви

стволовая древесина

корни

Подрост, подлесок

Напочвенный покров

Опад / КДО

Почва

подстилка

минеральный горизонт

процессы

фотосинтез / дыхание

аккумуляция (80-300 лет) / дыхание (только SW)

аккумуляция (80-300 лет) / дыхание

фотосинтез / дыхание

фотосинтез / дыхание

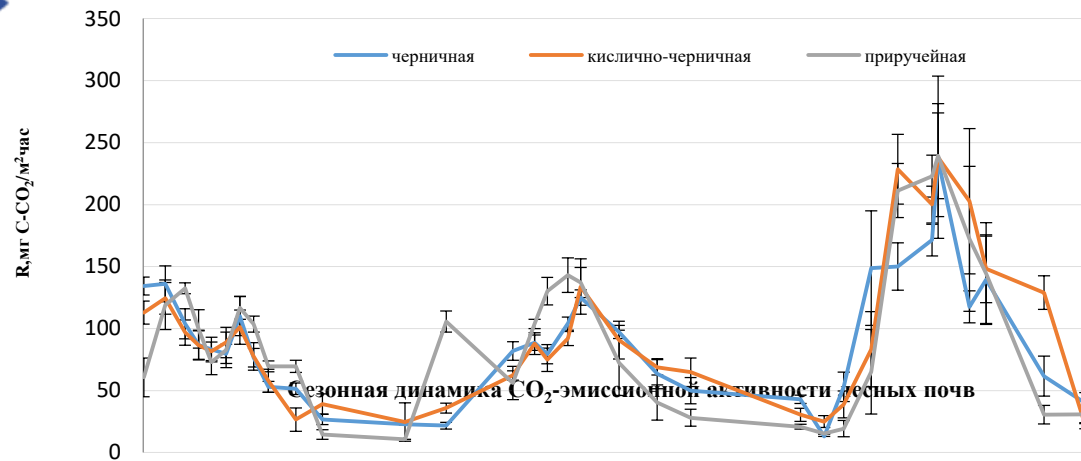
разложение (стволовая древесина от % HW)

аккумуляция (до 2 тыс. лет) / дыхание / разложение

(активное поступление сахаров ускоряет разложение имеющихся остатков)

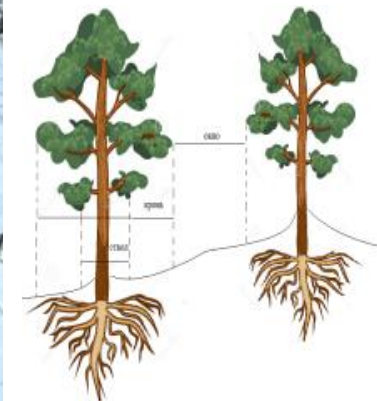


Изучение дыхания лесных почв Карелии



Установлена пространственная и временная неоднородность почвенного дыхания. Выявлены различия эмиссии CO_2 с поверхности почв в зависимости от типа почв, вида растительности и зоны фитогенного поля дерева. Температура и влажность почвы являлись наиболее значимыми абиотическими факторами, определяющими эмиссию CO_2 из почв.

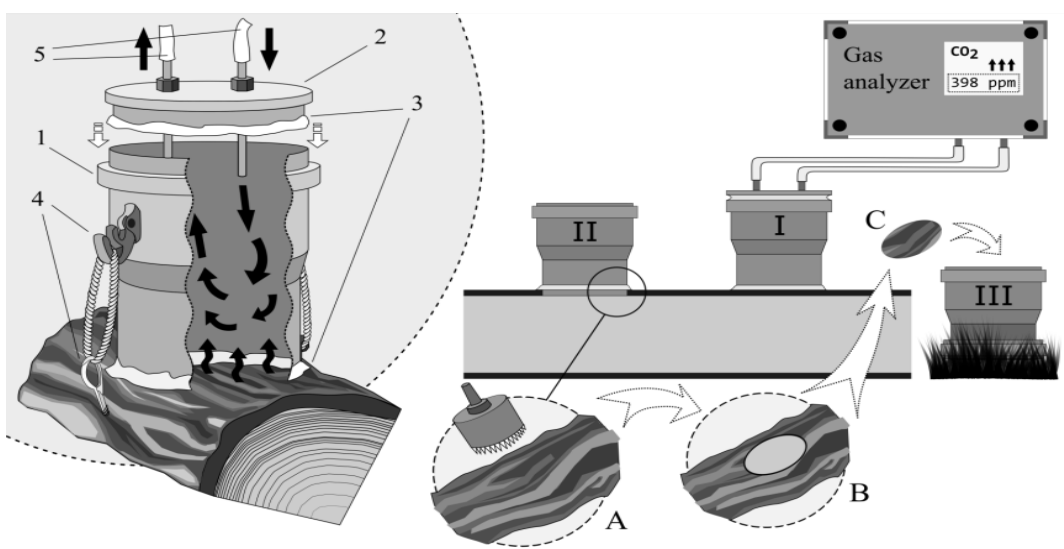
В условиях среднетаежной подзоны Карелии методом *root exclusion technique* проведена оценка вклада гетеротрофного дыхания в общую эмиссию CO_2 с поверхности почв хвойных лесов. Установлено, что доля микробного дыхания почв в вегетационном периоде составляет 55-77% от почвенного потока CO_2 . Полученные данные о вкладе гетеротрофного дыхания почв необходимы для количественной оценки баланса углерода в лесных экосистемах.



Оценено количество CO_2 , поступающего с поверхности почвы в зимний период, которое составляло 15-24% годовой эмиссии CO_2 , что позволит сократить недоучет потоков CO_2 в холодный период и повысить точность оценки величины годового баланса углерода в экосистемах.



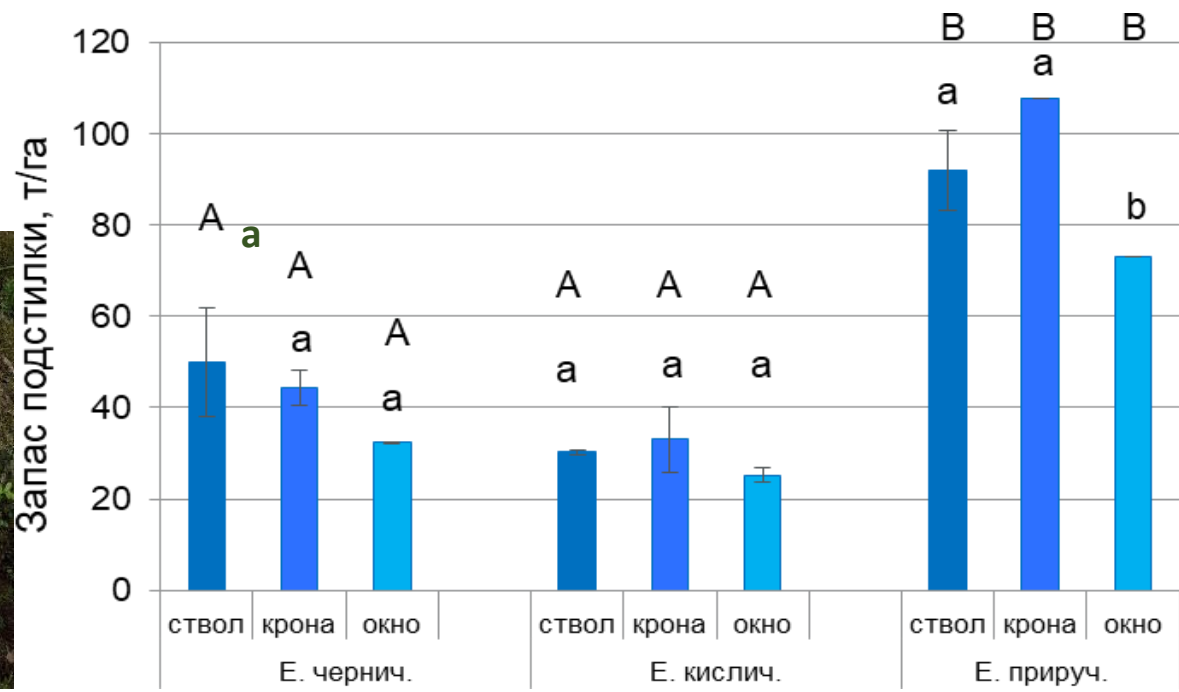
Углерод древесины, коры валежа и подстилки ельников



Запасы лесной подстилки в ельнике черничном варьировали от 26 до 108 т/га, составляя в среднем 46 ± 6 т/га.

Время оборачиваемости лесной подстилки в ельнике черничном составляло от 13-14 до 34 лет.

Интенсивность потока CO_2 с **валежных стволов** в старовозрастном ельнике (заповедник «Кивач») составило в среднем $98.3 \text{ мг С м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ (4 – 395) или **15-16%** общего гетеротрофного дыхания за вегетационный период.






Перерасчет стволовой фитомассы в запасы углерода (коэффициент - 0,5 из расчета, что в стволовой древесине массовое содержание С – 50 %, но по литературе – отклонения до 8%). В ядровой древесине (HW) накапливается большое количество полимеров фенольной природы, в результате чего % С в ней выше (различие до 7%).



У деревьев II и III категорий, по сравнению с I категорией (деревья-лидеры) ускоряется образование сердцевинной (мертвые клетки) древесины и увеличено содержание экстрактивных веществ. Выявление молекулярно-генетических механизмов этих процессов откроет возможности регулирования роста и густоты искусственных лесов.



Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration

[Peter Högberg](#) , [Anders Nordgren](#), [Nina Buchmann](#), [Andrew F. S. Taylor](#), [Alf Ekblad](#), [Mona N. Högberg](#), [Gert Nyberg](#), [Mikaell Ottosson-Löfvenius](#) & [David J. Read](#)

[Nature](#) 411, 789–792 (2001) | [Cite this article](#)



Towards a more plant physiological perspective on soil ecology

Peter Högberg¹ and David J. Read²

¹ Section of Soil Science, Department of Forest Ecology, SLU, SE-901 83 Umeå, Sweden

² Department of Animal and Plant Sciences, University of Sheffield, Sheffield, UK, S10 2TN

Масштабные исследования потоков ассимилятов в корни у сосны подтвердили, что растения действуют как «сахарные насосы», которые непосредственно поддерживают не только своих в основном облигатных симбионтов – микоризные грибы, но и другие группы специализированных почвенных организмов. Они также подчеркивают тот факт, что текущий ассимилят, выделяемый под землей, проходит через каскад сообществ. Это еще раз подтверждает представление об автотрофно-гетеротрофном континууме

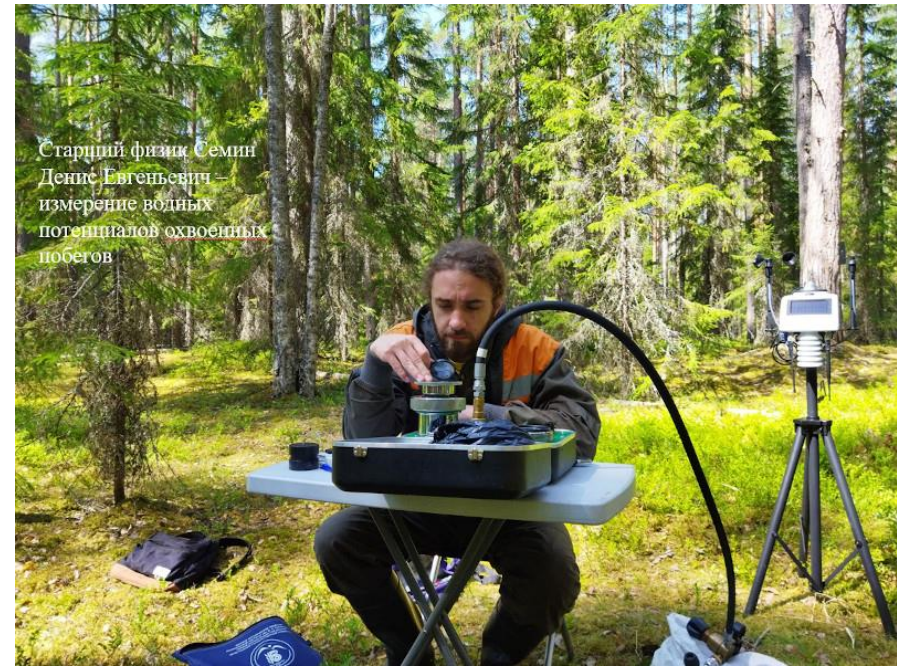




главный научный сотрудник, д.б.н.
Галибина Наталья Алексеевна – отбор
охвоенных побегов из средней части
кроны модельных деревьев сосны для
последующего измерения водных и
осмотических потенциалов



Старший научный сотрудник, к.б.н.
Тарелкина Татьяна Владимировна – отбор образцов
кору для дальнейших анатомических исследований



Старший физик Семин
Денис Евгеньевич – измерение водных
потенциалов охвоенных
побегов

Работы в этих направлениях организованы и на тестовом полигоне



**Спасибо за
внимание!**



Коллаж подготовлен С.Г. Новиковым