

Национальная академия наук Беларуси

*Государственное научное учреждение
«Институт леса Национальной академии наук Беларуси»*

На правах рукописи

УДК 630*577.4

*Никитин
Александр Николаевич*

**ФОРМИРОВАНИЕ ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА
В СОСНОВЫХ КУЛЬТУРФИТОЦЕНОЗАХ БЕЛАРУСИ**

06.03.03 – Лесоведение и лесоводство,
лесные пожары и борьба с ними

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата сельскохозяйственных наук

Научный руководитель
академик НАН Беларуси
и РАСХН, доктор с.-х. наук
профессор В.А. Ипатьев

Гомель, 2004

ОГЛАВЛЕНИЕ

Перечень условных обозначений	4
Введение	5
Общая характеристика работы	7
Глава 1. Об участии лесных биогеоценозов в глобальном цикле углерода	13
1.1. Роль биоты в круговороте углерода на Земле	13
1.2. Оценка значения лесов различных регионов в депонировании углерода	17
1.3. Исследования биологического круговорота углерода в лесных биогеоценозах	19
1.4. О методических особенностях изучения круговорота углерода в лесных биогеоценозах	23
Глава 2. Объект исследований. Программа и методика исследований	29
2.1. Физико-географическая характеристика региона исследования	29
2.2. Программа исследований	33
2.3. Объекты исследования	34
2.4. Методика исследований	35
Глава 3. Закономерности формирования запаса углерода в компонентах сосновых фитоценозов	43
3.1. Содержание углерода в компонентах соснового фитоценоза	43
3.2. Оценка биомассы и запаса углерода в древесной и подпо- логовой растительности с помощью аллометрических уравне- ний	51
Глава 4. Возрастная динамика накопления углерода в сосновых фитоценозах	63
4.1. Формирование запасов углерода в почве, лесной подстилке, подлеске и живом напочвенном покрове	63
4.2. Накопление углерода в древесном ярусе	70
4.3. Суммарное поглощение углерода сосновыми биогеоценозами	75
Глава 5. Выделение углекислого газа древесным детритом и почвой в сосновых культурценозах	77
5.1. Выделение углекислого газа в процессе разложения древесного детрита	77
5.2. Интенсивность выделения углекислого газа лесной подстилкой	81

	3
5.3. Выделение углекислого газа минеральными горизонтами почвы	82
Глава 6. Моделирование динамики и прогноз накопления углерода в сосновых культурфитоценозах	88
6.1. Имитационная модель роста древостоя и накопления углерода в сосновых культурфитоценозах	88
6.2. Результаты моделирования динамики накопления углерода в сосновых культурценозах	100
6.2.1. Влияние условий произрастания и начальной густоты на динамику накопления углерода культурами сосны	100
6.2.2. Динамика накопления углерода сосновыми культурфитоценозами в зоне действия источников промышленного загрязнения окружающей среды	105
6.2.3. Моделирование воздействия рубок промежуточного пользования на возрастную динамику накопления углерода древостоем и детритом	110
6.2.4. Прогноз изменения запасов углерода в сосновом культурфитоценозе при различных климатических параметрах и газовом составе атмосферы	119
6.3. Рекомендации по созданию культур и ведению хозяйства с целью депонирования углерода	124
Заключение	128
Список использованных источников	130
Приложения	159
Приложение 1. Таксационная характеристика пробных объектов	159
Приложение 2. Агрохимическая характеристика почв пробных объектов	164
Приложение 3. Зависимость массы углерода во фракциях древесных растений от их морфометрических показателей	166
Приложение 4. Запасы углерода в компонентах соснового фитоценоза	180

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- A – Возраст насаждения, лет;
 a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 – Коэффициенты уравнений;
B – Бонитет насаждения;
d – Диаметр дерева на высоте груди, см;
D – Средний диаметр насаждения, см;
G – Сумма площадей поперечного сечения, м²/га;
h – Высота дерева, м;
H – Средняя высота насаждения, м;
m – Масса отдельной фракции, кг;
M – Масса фракции древостоя, т/га;
P – Полнота насаждения;
W – Запас стволовой древесины насаждения, м³/га;
 z_n – Средний радиальный прирост за n последних лет, мм.
 δ – Доверительный интервал при 0,05 % уровне значимости;
 \bar{x} – Среднее арифметическое значение;

ВВЕДЕНИЕ

Человек постоянно находится в многообразных и разносторонних диалектических взаимоотношениях с окружающей средой и часто их результатом является возникновение нарушений и дестабилизация природных процессов. Однако, обладая огромным потенциалом саморегуляции и самовосстановления, природа способна противостоять этому явлению, она возвращается в первоначальное состояние, если уровень антропогенных нарушений не достиг определенного критического значения. После его превышения, регенерационный потенциал естественных природных комплексов оказывается недостаточным, для их восстановления необходима организация системы стабилизирующих мероприятий.

Одной из проблем, вызывающих сегодня наибольшее беспокойство, является обострение "парникового" эффекта и индуцированное им глобальное изменение климата. Причина потепления – антропогенное накопление в атмосфере оптически активных "парниковых" газов, среди которых ведущее положение занимает углекислый газ. Рост его содержания в атмосфере происходит главным образом в результате сжигания ископаемого топлива и изменения характера землепользования.

Подписание Рамочной Конвенции ООН по проблемам изменения климата (РКИК/ООН) почти 150 странами, в том числе и Республикой Беларусь, в Рио-де-Жанейро в июне 1992 г. свидетельствует о повсеместном признании того факта, что изменения климата представляют серьезную опасность для мировой экологии и экономики.

Лесные экосистемы, занимающие значительную часть суши, обладают огромным запасом свободной энергии, что обуславливает их мощное воздействие на окружающую среду и способность к самовозобновлению. Хорошо известна их почвозащитная, водорегулирующая и водоохранная функция, их воздействие на локальный климат и состав воздуха.

Способность лесных биогеоценозов быстро связывать большие количества углерода и долго удерживать его в составе органического вещества, вызвали интерес к ним, как к потенциальному инструменту преодоления или смягчения парникового эффекта.

Возможность существенного снижения содержания углекислого газа в атмосфере через его секвестр лесами была аргументирована в начале 1990 г. Карлом Хазенкампом и доктором Германом Шером в меморандуме «Международная крупномасштабная программа лесоразведения на территории Российской Федерации как вклад в предотвращение климатической катастрофы». Как замечено академиком РАСХН А.И. Писаренко – «...дополни-

тельное создание лесов – это самый хороший и недорогой путь к спасению Земли. Существует реальная возможность посадить столько леса, сколько необходимо планете, чтобы связать в деревьях весь объем выбрасываемой двуокиси углерода и таким способом помочь сохранению климата на Земле».

Доминирующее на сегодняшний день отношение к лесу, как к возобновимому источнику материальных благ, является причиной того, что в глобальном масштабе леса являются скорее источником углекислого газа, чем его стоком. Вырубка лесных массивов в тропическом поясе, лесные пожары, техногенное загрязнение и неупорядоченное промежуточное пользование отнюдь не способствуют поглощению и накоплению углерода лесами. В такой ситуации является необходимой смена подходов к оценке значения лесов, учет не только прямой материальной выгоды от их эксплуатации, но и нематериальной – средообразующих и средорегулирующих функций.

В силу вышесказанного, интенсивность стока атмосферного углекислого газа в существующие лесные биогеоценозы далек от потенциального уровня. Поэтому есть возможность увеличения роли лесов в качестве стабилизатора глобального климата путем применения целенаправленных лесохозяйственных мероприятий.

Неопределенность в оценке существующих потоков углерода между лесными биогеоценозами и атмосферой в глобальном и региональном масштабах вызывает необходимость в целенаправленных исследованиях формирования баланса и накопления углерода лесами в разнообразных условиях их произрастания и под влиянием различных воздействий внешней среды, в том числе и антропогенных. Повысить значение лесов, как инструмента стабилизации климата, позволит разработка направленных на повышение депонирования углерода лесохозяйственных мероприятий.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Проблема накопления органического углерода в лесных насаждениях является весьма актуальной на данном этапе развития общества. Леса это практически единственный инструмент, с помощью которого можно снизить содержание в атмосфере углекислого газа - главной причины парникового эффекта. В тоже время, имеющиеся оценки значения лесов имеют высокую степень неопределенности, главная причина которой в недостаточном количестве локальных исследований в данном направлении в различных типах и возрастных группах лесных насаждений. На территории Республики Беларусь специальных исследований запасов и динамики накопления углерода в лесных биогеоценозах не проводилось, поэтому до сих пор не имеется достаточной информации о влиянии лесохозяйственной деятельности на баланс углерода в лесных биогеоценозах, отсутствуют рекомендации по ведению хозяйства в лесах, специально созданных с целью депонирования углерода.

В связи с принятием ООН международной конвенции по изменению климата (The Climate Change Convention, 1992) необходима корректная оценка источников и стоков атмосферного углекислого газа, что и вызывает необходимость изучения баланса углерода в лесных экосистемах нашей республики.

Динамика накопления углерода в, преобладающих в лесном фонде Беларуси, сосновых насаждениях, и прогноз их изменений в результате антропогенной трансформации окружающей среды и проведения лесохозяйственных мероприятий и оценка их потенциала в депонировании углерода является весьма актуальной задачей для нашего, находящегося в центре Европы, государства.

Связь работы с крупными научными программами, темами

Диссертационная работа связана со следующими научно-исследовательскими программами, выполнявшимися в лаборатории лесной экологии Института леса НАН Беларуси:

«Разработка рекомендаций по комплексной оценке антропогенного ущерба, наносимого лесным экосистемам, и нормативов по взысканию штрафов за него», № ГР 199854, период выполнения 1998 – 1999 гг.

ГПФИ «Лесные биогеоценозы», задание «Исследование основных закономерностей функционирования хвойных фитоценозов в условиях техногенного загрязнения окружающей среды и разработка научных основ организа-

ции ведения лесного хозяйства в них», № ГР 2001324, период выполнения 2001 – 2002 гг.

ГПФИ «Лесные биогеоценозы», задание «Исследование закономерностей изменения газового режима сосновых культурценозов под воздействием природных и антропогенных факторов», № ГР 20015089, период выполнения 2001 г.

ГНТП «Леса Беларуси», задание 15 «Основные положения по ведению лесного хозяйства в сосновых лесах Республики Беларусь, произрастающих в условиях техногенного загрязнения», № ГР 20014038, срок выполнения 2001 – 2002 гг.

Работа поддержана грантом на выполнение научно-исследовательских работ докторантами, аспирантами и соискателями Национальной академии наук Беларуси «Закономерности формирования запаса углерода и его баланс в сосновых лесах», 2001 г.

Грантом БРФФИ Б03-99 «Исследование запасов, распределения и динамики органического углерода в лесных (автоморфных) почвах Республики Беларусь», 2003 – 2004 г.

Цель и задачи исследования

Целью работы явилось исследование динамики накопления углерода сосновыми культурценозами и воздействия на нее лесохозяйственных мероприятий и антропогенного изменения условий окружающей среды.

В связи с поставленной целью решались следующие задачи:

1. Изучить особенности содержания органического углерода в компонентах сосновых фитоценозов на территории Беларуси;
2. Исследовать специфику формирования запасов углерода и установить связи между морфометрическими показателями древесных растений и запасами углерода в них;
3. Установить влияние лесохозяйственных мероприятий и изменения условий окружающей среды на процессы накопления углерода в сосновых фитоценозах;
4. Разработать рекомендации по повышению углероддепонирующей функции сосновых культур.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования явились сосновые фитоценозы искусственного происхождения, произрастающие в условиях Полесско-Приднепровского геоботанического округа подзоны грабовых дубрав.

Предмет исследования – процессы накопления углерода сосновыми насаждениями под влиянием естественных и антропогенных факторов.

Гипотеза: Лесные насаждения в процессе своего развития являются стоком атмосферной углекислоты. Скорость и суммарная величина поглощения углерода находится под влиянием условий произрастания, характера и степени антропогенного воздействия на окружающую среду, специфики проводимых лесохозяйственных мероприятий.

Методология и методы проведения исследований

В основу исследований динамики накопления и баланса углерода в сосновых культурценозах положены основные методологические принципы биогеоценологии, экологии растений, лесоведения и биокибернетики. Автор исходил из положения о наличии развитых причинно-следственных связей между особенностями баланса углерода в лесных биогеоценозах и комплексом факторов, под воздействием которых они находятся.

Определение содержания углерода в основных компонентах лесного биогеоценоза проводилось при помощи стандартных методов мокрого озоления растительных и почвенных образцов. Исследование запасов углерода в горизонтах почвы, живом напочвенном покрове и подпологовой древесной растительности осуществлялся посредством выборочного метода. В основу же расчета запаса углерода во фракциях древостоя положены результаты многолетних исследований процессов роста древесных растений на постоянных пробных площадях. Расчет запасов углерода в древесной растительности проводился с использованием разработанных автором аллометрических уравнений, связывающих между собой массу отдельных фракций и морфометрические признаки деревьев. Особенности потери углерода почвой и древесным детритом изучались при помощи специально поставленного лабораторного эксперимента.

Ответная реакция лесных насаждений на изменение ряда факторов окружающей среды исследовалась с использованием созданной автором имитационной модели, в основу которой легли многолетние наблюдения за биопродукционными процессами в сосновых культурценозах.

Научная новизна и значимость полученных результатов

Впервые для природно-климатических условий Республики Беларусь исследована динамика накопления и распределение углерода во всех компонентах сосновых культурфитоценозов различного возраста. Для этого разработаны уравнения связи между запасом углерода в древесной растительности и ее

морфометрическими показателями и установлено содержание органического углерода в компонентах лесного фитоценоза. Имитационная модель динамики накопления углерода в сосновом насаждении позволила раскрыть основные механизмы воздействия метеорологических факторов и проводимых лесохозяйственных мероприятий на баланс углерода в лесных экосистемах.

Результаты исследований позволяют установить роль сосновых культур-фитоценозов в балансе углекислого газа на территории Беларуси, оценить воздействие глобального изменения климата и газового состава атмосферы на углероддепонирующую функцию лесов. Разработанная модель может быть применена в моделировании баланса углерода в насаждениях не только сосны, но и других лесообразующих пород.

Практическая (экономическая, социальная) значимость полученных результатов

Результаты работы позволяют оценить значение лесов в стабилизации глобальной климатической обстановки и обратить внимание на то, что леса являются не только источником материальных ресурсов, но и, что не менее важно – нематериальных благ.

На основании результатов исследования разработана система мероприятий, позволяющая повысить эффективность существующих и вновь создаваемых лесных насаждений для преодоления парникового эффекта.

Полученные результаты могут быть использованы при создании углероддепонирующих насаждений и оценки их эффективности, что обеспечит возможность участия лесного хозяйства республики в международной программе работ по ликвидации парникового эффекта, для привлечения международных инвестиций на организацию углероддепонирующих насаждений.

Уравнения связи между биомассой фракций лесных древесных растений и их морфометрическими признаками могут быть использованы для определения весовых продукционных показателей сосновых насаждений не только на территории Республики Беларусь, но и сопряженных регионов России и Украины.

Положения диссертации, выносимые на защиту

На защиту выносятся:

- особенности связи биомассы и запаса углерода в древесных растениях с их морфометрическими показателями специфические для при-

родно-климатических условий Полесско-Приднепровского геоботанического округа подзоны грабовых дубрав;

- закономерности возрастной динамики накопления углерода в сосновых фитоценозах искусственного происхождения;
- специфика выделения углекислого газа древесным детритом, лесной подстилкой и минеральными горизонтами почвы в различных гидро-термических условиях;
- модель динамики накопления углерода и оценка воздействия эндогенных и экзогенных факторов на накопление углерода в сосновых культурфитоценозах.

Личный вклад соискателя состоит в составлении программы и разработке методики исследований. Полевые работы и лабораторные опыты проведены лично автором или при его участии. Статистическая обработка данных, построение имитационной модели и ее испытание выполнено автором.

Апробация результатов диссертации

Основные положения диссертации и полученные результаты докладывались и обсуждались на следующих конференциях, съездах и семинарах:

1. Третьей республиканской научной конференции студентов Республики Беларусь (14 – 16 мая, 1997 г., Минск, БГУ),
2. XXVI Студенческой конференции по естественным, техническим и гуманитарным наукам (10 марта – 30 апреля, 1997 г., Гомель, ГГУ им. Ф. Скорины),
3. Международной научной конференции молодых ученых «Лес, наука, молодежь» (5 – 7 октября, 1999 г., Гомель, ИЛ НАН Б),
4. I Международной межвузовской школе-семинаре по экологии «Экология 2000: Эстафета поколений» (17 – 27 апреля 2000 г., Москва, МГУЛ),
5. Международной научно-практической конференции «Леса Беларуси и их рациональное использование» (29 – 30 ноября 2000 г., Минск, БГТУ),
6. II Съезде белорусского общества почвоведов «Почвы и их плодородие на рубеже столетий» (26 – 29 июня 2001 г., Минск, БелНИИ почвоведения и агрохимии),
7. II Международной конференции молодых ученых, посвященной проф. И.К. Пачоскому «Леса Евразии в XXI веке: восток – запад» (1 – 5 октября 2002 г, Каменюки, Беловежская пуша),

8. Международной научно-технической конференции «Леса Европейского региона – устойчивое управление и развитие» (4 – 6 декабря 2002 г., Минск, БГТУ),
9. Международной конференции ведущих специалистов, молодых ученых и студентов «Сахаровские чтения 2003 года: экологические проблемы XXI века» (19 – 20 мая 2003 г., Минск, Международный государственный экологический университет им. А.Д. Сахарова),
10. 7-ой Пущинской школе-конференции молодых ученых «Биология - наука XXI века» (14-18 апреля 2003 г., Пущино)
11. Международной научной конференции молодых ученых «Лес в жизни восточных славян от Киевской Руси до наших дней» (27 – 29 июня 2003 г, Гомель, Институт леса НАН Б)
12. Международной научно-практической конференции «Мониторинг и оценка состояния растительного покрова» (28 – 31 октября 2003 г., Минск, ИЭБ НАН Б)

Опубликованность результатов

По материалам диссертации опубликовано 23 научные работы, из которых - 11 научные статьи и 12 тезисы ВУЗовских, региональных и международных конференций, общим объемом 84 страницы (6,1 печ. л.).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, основной части, представленной 6 главами, заключения, списка литературы и четырех приложений. Содержит 206 страниц машинописного текста, из которых 48 страниц занимают приложения, 28 таблиц, 35 рисунков. Список литературы включает 357 наименований, в т.ч. 129 на иностранном языке.

ГЛАВА 1

ОБ УЧАСТИИ ЛЕСНЫХ БИОГЕОЦЕНОЗОВ В ГЛОБАЛЬНОМ ЦИКЛЕ УГЛЕРОДА

1.1. Роль биоты в круговороте углерода на Земле

Известно, что углерод на Земле неравномерно распределен между несколькими основными пулами. Наибольшее его количество сосредоточено в осадочной оболочке ($100 \cdot 10^{21}$ г) [1]. В океанах и других водоемах растворено $130 \cdot 10^{18}$ г, в живых организмах – $0,8 \cdot 10^{18}$ г, в почвах – $2 \cdot 10^{18}$ г, в атмосфере – $0,7 \cdot 10^{18}$ г [2]. Между этими пулами происходит постоянный обмен углеродом, главной движущей силой такого обмена является деятельность живых организмов [3, 4, с. 30]. Ежегодно в процессе фотосинтеза поглощается из атмосферы и закрепляется в биомассе зеленых растений около $300 \cdot 10^{15}$ г углекислого газа [2, 5]. В результате человеческой деятельности ежегодно дополнительно поступает в атмосферу около $7 \cdot 10^{15}$ г углекислого газа [1].

Атмосферный пул углерода самый маленький и поэтому любые нарушения в сложившейся системе глобального круговорота углерода в этом пуле способны вызвать изменение содержания углекислого газа в атмосфере. Человек своей хозяйственной деятельностью существенно модифицирует сложившийся динамический баланс между различными пулами углерода [6]. Сжигая ископаемое топливо, изменяя характер наземной растительности (вырубая леса, опустынивая земли и пр.) он увеличивает поступление углекислого газа в атмосферу, повышает его концентрацию в ней [7, 8]. Скорость годового прироста концентрации атмосферного CO_2 в 60-х гг. XX столетия составляла $0,7 \text{ ppm} \cdot \text{год}^{-1}$, а в 70-х уже – $1,4$ [9], темпы прироста постоянно увеличиваются [10].

В силу своих физико-химических свойств углекислый газ относится к группе оптически активных газов, т.е. газов по-разному пропускающих и отражающих излучения различной длины волны. Легко пропуская коротковолновое излучение к поверхности земли, он отражает определенную часть более длинноволнового, в которое превращается первое после отражения. Задерживая, таким образом, энергию у поверхности Земли, углекислый газ (и некоторые другие газы, имеющие аналогичный эффект) вызывают повышение ее температуры. Данное явление носит название «парникового» эффекта. Естественно, что повышение содержания углекислого газа в составе атмосферы должно вызвать усиление «парникового» эффекта и увеличение температуры поверхности Земли. По данным на 1997 г. [9] средняя температура на Земле стала выше на $0,6^\circ\text{C}$, чем 100 лет назад. При сохранении теку-

щих тенденций она повысится в 2100 г. на 6 °С. Последствия «парникового» эффекта проявляются не только в потеплении климата, но и в увеличении числа штормов и ураганов, затоплении низлежащих земель и меньшей безопасности урожая из-за засух и эрозии почв [11], изменении видового состава растительных сообществ [12], потере пресных вод и опустынивании, сдвиге границы бореальной зоны к северу [1], изменении породного состава и возрастной структуры бореальных лесов [13, 14].

Специалисты видят два способа разрешения проблемы «парникового» эффекта. Первый из них заключается в сокращении выбросов «парниковых» газов от сжигания ископаемого топлива и вырубки лесов. Однако на современном этапе развития общества не представляется возможным достижение существенных результатов в этом направлении. Второй способ – поглощение избытка углекислого газа атмосферы природными объектами [15, 16, 17]. Мировой океан обладает огромным потенциалом в поглощении углекислого газа из атмосферы, однако интенсивность этого процесса, в силу естественных причин, не обеспечивает сток атмосферной углекислоты с необходимой скоростью, к тому же человек не в силах повлиять на нее. Высокая интенсивность поглощения углекислого газа атмосферы характерна и для наземной растительности. Масштабы влияния различных типов биогеоценозов на глобальный цикл углерода и их способность стабилизировать его после антропогенного нарушения определяются особенностями биопродукционных процессов и процессов разложения отмершего органического вещества.

В агроэкосистемах процессы входа и выхода углерода в зернопахных севооборотах, как правило, сбалансированы [18]. По оценкам Замолотчикова Д. Г. и др. [19] годовой углеродный баланс в тундровых экосистемах близок к нулевому. Болота занимают 2 – 4 % поверхности Земли, но их рассматривают, как один из основных пулов углерода биосферы [20, 21]. В ветландах сконцентрировано 15% органического углерода Земли. Специфическая болотная функция заключается в незамкнутости круговорота веществ [22]. В торфе болот России заключено $113,5 \cdot 10^{15}$ г углерода, а в мире – 145 – 455. Н.Н. Бамбалов и В.А. Ракович [23] приводят для накопления углерода в болотах Беларуси следующие цифры: 150 – 500 кг в год на 1 га, в зависимости от типа болотного фитоценоза.

Наибольшее процентное поглощение CO_2 принадлежит лесам [15]. Занимая 28 % площади суши, они вырабатывают 66 % органического вещества. Это объясняется их высоким коэффициентом эффективности фотосинтеза (0,33%). Леса являются и главными резервуарами биологически связанного углерода (в них сосредоточено 2/3 всего биосферного запаса углерода).

По мнению Уткина А. И. [24] в лесах углерод накапливается в основном в пуле фитомассы, в степях и лугах – в пуле гумуса, в тундре – в пуле фитодетрита.

Ряд ученых [7, 15, 25 – 29] придерживается мнения, что леса являются активными стабилизаторами круговорота углерода. Роль лесов в нейтрализации «парникового» эффекта может быть усилена при помощи специальных лесохозяйственных мероприятий [30 – 39, 40, с. 40]. Причем эти мероприятия вполне возможно увязать с другими объектами лесопользования: запасами деловой древесины, биоразнообразием, эстетикой [41].

В силу масштабов продукционных процессов и длительности аккумуляции углерода в биомассе, леса признаны наиболее надежной системой для предотвращения «парникового» эффекта [7], поэтому на международной конференции в Рио-де-Жанейро по окружающей среде и развитию (1992) было отмечено, что поглощение «парниковых» газов возможно, в основном, за счет усиления усвоения CO_2 лесными насаждениями [42]. Одним из главных способов поглощения «парниковых» газов в Протоколе Киото [43, статья 3.3] признана лесохозяйственная деятельность (создание и восстановление лесных массивов). С целью усиления поглощения углекислого газа атмосферы, разрабатываются методы создания специальных углероддепонирующих насаждений [42, 44, 45] и повышения фиксации углерода в лесных культурах, созданных для иных задач [46]. Как замечено А.И. Уткиным [24], в будущем система лесохозяйственных мероприятий изменится таким образом, что если и не будет полностью ориентированной на углеродный цикл, то в значительной мере будет вынуждена считаться с ним. По состоянию на сегодняшний день можно выделить три основных способа использования лесных насаждений в качестве стабилизатора глобального климата [47]:

- накопление и связывание углерода в биомассе и почве существующих и вновь создаваемых насаждений;
- накопление углерода в изделиях из древесины. Особенно долго углерод удерживается в древесине, используемой в качестве строительного материала;
- использование лесной биомассы в качестве источника энергии [48], способного во многих случаях заменить ископаемое топливо.

Леса нашей планеты занимают площадь $4 \cdot 10^9$ га [49], на которой сосредоточены запасы углерода в $8,30 \cdot 10^{17}$ г в почве и биомассе [38], а ежегодное поглощение CO_2 лесами составляет $5,5 \cdot 10^{15}$ г. [50]. Однако, в результате дыхания автотрофных и гетеротрофных организмов, значительная часть поглощенного углерода возвращается в атмосферу. Запас углерода в тропических лесах составляет $3,15 \cdot 10^{17}$ г, бореальных – $2,91 \cdot 10^{17}$ г, тундре, лесотундре,

альпийских экосистемах и парамо – $2,04 \cdot 10^{17}$ г [51]. На исключительную роль бореальных лесов в стабилизации углеродного баланса планеты указывает академик А.И. Писаренко [52].

Выделяется углерод из лесных экосистем в результате пожаров, ураганов, засух, повреждения насекомыми-фитофагами и пр. [53, 54]. Пожары в бореальных лесах вызывают выброс значительных количеств углекислого газа и других оптически активных веществ [55, 56]. Углекислый газ, который длительное время удерживался в лесной растительности, резко выбрасывается в атмосферу. Кроме того, пожар уничтожает и сам объект стока.

Существенные изменения в баланс углерода в лесных экосистемах вносит человек в результате хозяйственной деятельности [57, 58]. Так К.И. Кобак с соавторами [59] отмечают, что в конце XIX - начале XX веков леса умеренной зоны были источником углекислого газа, в связи с вырубками. Сейчас площади бореальных лесов стабилизировались, и они превратились в сток. Тропические леса на сегодняшний день являются источником CO_2 , и ситуация вряд ли изменится в ближайшем будущем. Согласно данным полученных А.А. Титляновой и Н.П. Косых [60] первичная продукция Западной Сибири 150 лет назад составляла $2,64 \cdot 10^{11}$ г сухого вещества в год, в настоящее время она снизилась до $1,60 \cdot 10^{11}$ г·год⁻¹ в связи с изменениями в землепользовании. Еще больше снизилось поступление растительных остатков в почву. За 150 лет в связи с этим в атмосферу поступило около $2,50 \cdot 10^{12}$ г углерода в виде CO_2 . В Финляндии в заготавливаемых за год лесоматериалах содержится $9,9 \cdot 10^{12}$ г углерода [61]. Эмиссия углерода в результате заготовки и транспортировки составляет $0,1 \cdot 10^{12}$ г. В ходе производственных процессов 1/3 углерода, связанного в древесине, выделяется в атмосферу. В дальнейшем, спустя 5 и 10 лет, соответственно только около 40 и 33 % углерода, находившегося изначально в продукции, продолжает оставаться в ней.

Человек оказывает не только прямое, но и косвенное влияние на углеродный баланс лесов. Антропогенное повышение концентрации углекислого газа в атмосфере и потепление климата должно вызвать увеличение продуктивности большинства растительных сообществ [5, 62 – 70] за счет т.н. CO_2 -удобрения и благоприятного влияния умеренного повышения температуры на продукционные процессы. Это явление должно усилить их углерод-депонирующую функцию [71, 72]. Тем не менее, необходимо иметь в виду, что изменение условий окружающей среды – повышение концентрации CO_2 и среднегодовой температуры – может привести к дестабилизации функционирования экосистем, что повлечет за собой снижение запасов углерода в наземной биоте, и падение ее значения в качестве стабилизатора глобального климата [73, 74, 75]. Окончательный эффект данного явления еще не до кон-

ца ясен [76 – 80], т.к. оценки изменений углеродного баланса в результате потепления климата и изменения газового состава атмосферы построены, в основном, исходя из результатов кратковременных экспериментов, продолжительное же действие названных факторов, возможно, приведет к другим результатам [81].

Л.К. Кайбияйненом с соавторами [82] установлено, что в зоне техногенного загрязнения уменьшается интенсивность фотосинтеза, и это сказывается на результирующей величине углеродного баланса. Однако при этом интенсивность разложения мертвых органических остатков не изменилась. На то, что глобальное техногенное загрязнение может свести эффект от CO_2 -удобрения к нулю, указывает К.И. Кобак и др. [75].

Несмотря на пристальное внимание ряда исследователей к рассматриваемой проблеме, остается значительная неопределенность в оценке будущей роли наземных экосистем в глобальном круговороте углерода [83], т. к. существует неадекватность в понимании текущих пулов и потоков углерода, а также потенциального воздействия возрастающей концентрации CO_2 в атмосфере на экосистемы. Это вызывает необходимость дополнительного, детального изучения круговорота углерода в наземных, главным образом, лесных, биогеоценозах [84].

Необходимой основой для оценки участия лесов в глобальном углеродном балансе являются результаты региональных исследований, которые в свою очередь должны быть основаны на определенной совокупности наблюдений баланса углерода в конкретных лесных сообществах. В соответствии с этой схемой и построен дальнейший литературный обзор.

1.2. Оценка значения лесов различных регионов в депонировании углерода

Рядом ученых [13, 15, 25, 27, 28, 29, 32, 34, 36, 41, 56, 59] проведено исследование участия лесов различных регионов в углеродном балансе планеты. Необходимо, однако, отметить, что эти оценки являются весьма приближенными, так как построены в расчете на ряд допущений [85], и как отмечают некоторые авторы, у них нет полной уверенности не только в величине, но и в знаке баланса углерода в лесах того или иного региона [38]. Часто в таких оценках не учитываются те или иные пулы углерода, особенно характерным в отношении лесных экосистем является игнорирование почвенного пула, весьма существенного по объему [24, 36, 56].

По сведениям Б.Н. Моисеева и др. [85] различия оценок запаса и прироста углерода в лесах России у разных авторов могут достигать 400%. Что объясняется:

- 1) различием в методах и их систематической ошибкой;
- 2) случайными и субъективными ошибками;
- 3) трудностями измерений и неполным учетом некоторых составляющих.

Наиболее вероятные оценки запаса углерода в живой и мертвой фитомассе лесов России находятся в диапазоне от $40 \cdot 10^{15}$ до $60 \cdot 10^{15}$ г.

По оценкам А.С. Исаева и др. [87] запас углерода в живой фитомассе лесов России – $35,07 \cdot 10^{15}$ г. В. А. Алексеев с соавторами [88], основываясь на данных лесоинвентаризации, показателях фитомассы деревьев и других элементов растительности лесных экосистем и результатов картирования, считают, что в лесных экосистемах России содержится $118,8 \cdot 10^{15}$ г углерода, из них 23,6% приходится на лесную растительность в целом, 14,1% на мертвую массу и 62,3% на почву. А леса и болота России в сумме содержат $187,923 \cdot 10^{15}$ г углерода, или 11,7% его мировых запасов в этих двух биомах [89]. А.З. Швиденко и др. [90] установлено, что в наземных экосистемах России запасено $54,12 \cdot 10^{15}$ г углерода, 82,1% из которых приходится на леса. По подсчетам Писаренко А. И. [7] запас углерода в лесах России составляет $25,6 \cdot 10^{15}$ г, а с учетом нижних ярусов, стлаников и кустарников – $28 \cdot 10^{15}$ г. В то время как в почвах России сосредоточено $187,6 \cdot 10^{15}$ г углерода, 63 % из них приходится на лесные экосистемы. В связи с климатическими особенностями баланс между ассимиляцией и диссимиляцией углерода в лесах России в среднем сдвинут в сторону ассимиляции [91], поэтому они являются стоком атмосферной углекислоты. В год леса России депонируют $120 \cdot 10^{12}$ – $215 \cdot 10^{12}$ г углерода. По данным А.О. Kokorin с соавт. [92] российские леса ежегодно запасают $160 \cdot 10^{12}$ г углерода. Р. Т. Карабань и др. [34] подсчитано, что лесами России, Украины, Беларуси и Казахстана на 1988 год поглощалось $3,00 \cdot 10^{15}$ г углерода.

Имеются оценки и для других регионов планеты, в частности: Финляндии [93], Эстонии [13], Польши [94], отдельных земель Германии [95], Турции и Болгарии [96], США [97, 98], долины р. Амазонки [99], Центральной Амазонии [100], Коста-Рики [101] украинских Карпат [102], Бразилии [103, 104]. Во всех случаях делается вывод о положительном значении лесов в разрешении проблемы глобального изменения климата. Отмечается [105], что в зоне между 30 и 60° с. ш. находится главный район стока углерода.

По подсчетам П.И. Лакиды [106] средняя плотность углерода в лесах Украины составляет $6,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$, Молдовы – 4,5, Беларуси – 5,3, Литвы – 6,3,

европейской части России – 4,6. Согласно данным, приводимым Р.Е. Курри и др. [93] в бореальных лесных экосистемах Финляндии содержится 10 – 11 кг $C \cdot m^{-1}$, в растениях - 3,4, а в 75 см слое почвы 7,2 кг $C \cdot m^{-1}$.

Сотрудниками Международного института прикладного системного анализа (IIASA) для покрытой лесом площади Республики Беларусь запас углерода оценен в $374,70 \cdot 10^{12}$ г [107]. В материалах ФАО [108] для лесов и приравненных к ним земель (площадь $8936 \cdot 10^3$ га) Республики Беларусь запас углерода в древесных фракциях, включая мертвую древесину, но без листвы и растений нижних ярусов, определен в размере $380,01 \cdot 10^{12}$ г С. По расчетам Уткина А.И. и др. [109] в лесах Беларуси сосредоточено около $267 \cdot 10^{12}$ г углерода ($46,7 - 48,3$ т С \cdot га $^{-1}$), из них на сосну приходится $141,33 - 151,96 \cdot 10^{12}$ г ($41,7 - 44,8$ т С \cdot га $^{-1}$). Чистая первичная продукция углерода составляет $21,3 - 23,0 \cdot 10^{12}$ г С \cdot год $^{-1}$, из них на сосну $11,9 - 13,7 \cdot 10^{12}$ г С \cdot год $^{-1}$. Согласно данным, приводимым Л.Н. Рожковым [110], ежегодно лесами Беларуси связывается порядка $15 \cdot 10^{12}$ г. CO_2 . Прогнозная эмиссия «парниковых» газов в эквиваленте CO_2 на 2001 г. по Беларуси находится на уровне $98,6 \cdot 10^{12}$ г. Таким образом, даже в отношении такого относительно небольшого региона как Республика Беларусь у исследователей нет единого мнения по поводу углеродной функции лесных насаждений, что говорит в пользу необходимости проведения дополнительных исследований.

Наиболее приемлемым способом борьбы с «парниковым» эффектом является создание искусственных лесных насаждений. Динамика накопления углерода в культурах сосны различных природных зон России изучена В.А. Усольцевым и др. [111]. Имеются данные по лесным плантациям Новой Зеландии [112], по искусственным соснякам Украины [113, 114], по посадкам криптомерии в Японии [115]. Несомненно, что мероприятия по созданию углероддепонирующих насаждений одного отдельно взятого государства, даже обладающего значительной площадью, не могут существенно повлиять на глобальный климат, однако совместные действия всех стран в этом направлении должны привести к положительному эффекту [75].

1.3. Исследования биологического круговорота углерода в лесных биогеоценозах

Оценки динамики запасов углерода в лесных биогеоценозах отдельных регионов и планеты в целом должны, прежде всего, основываться на изучении круговорота углерода в конкретных биогеоценозах. Такие исследования [116, 117, 118, 119, 120] содержат предпосылки для получения полной карти-

ны особенностей углеродного цикла в различных условиях произрастания леса.

Исследуя 40-летние древостои в Западной Сибири, В. Д. Стаканова и И. А. Короткова [121] установили, что в фитомассе хвойных запасается ($\text{т С} \cdot \text{га}^{-1}$ в год) 0,05 – 0,30, в Средней Сибири 0,04 – 0,25 и в Восточной Сибири 0,02 – 0,15. В 100-летнем насаждении годовичная абсорбция углерода в фитомассе на 20 – 60 % ниже. У мелколиственных видов аккумуляция углерода в годичной фитомассе на 10 – 20 % ниже, чем у хвойных. Баланс углерода в молодых средневозрастных и приспевающих хвойных и лиственных насаждениях в лесотундре и северной тайге позитивен.

По данным Э.Ф. Ведровой [122] надземная масса в сосняке осоково-орляковом (80 лет) аккумулирует на гектар 108320 кг углерода; 73% (от надземной массы) сосредоточено в стволе, в хвое – 4,3%, в подземной части – 20%. Поток углерода из атмосферы составил $4753 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$, чистая аккумуляция в надземной биомассе – $1635 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$, а в подземной – $389 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$. В целом баланс углерода не сбалансирован и идет его накопление в биогеоценозе.

Согласно исследованиям Л.С. Шугалей [123] основная масса углерода в сосняках лесостепи I – II бонитета сосредоточена в надземной части древостоя и в почве, в сумме запас углерода достигает $148 - 232 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ углерода. В подверженных антропогенному прессу сосняках его содержание ниже.

По данным Л.К. Кайбияйнен и др. [124] годовичная фиксация углерода при фотосинтезе в сосняке черничном составила $7,5 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Если годовичную фиксацию принять за 100 % то дыхание хвои будет составлять 22 %, поток с поверхности почвы - 37 % (25 % на почвенную респирацию), эмиссия углекислого газа стволами и ветвями - 14 %, годовичный сток – 27 %.

Изучая ненарушенные лесные широколиственные сообщества Юго-Западной Англии G.L. Patenaude и др. [125] установили, что в них сосредоточено $346 - 616 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ углерода, из которого в среднем $2 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ приходится на мертвую древесину, $3 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ на лесную подстилку, $18 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ на подпологовую древесную растительность.

При системном подходе к изучению углеродного баланса в биогеоценозах возникает необходимость разделить его на достаточно обособленные вместилища углерода – пулы и определить потоки углерода между ними. Основная исследовательская задача заключается в нахождении величины запасов углерода во всех пулах, и измерении интенсивности потоков углерода внутри экосистем и между экосистемами и окружающей средой, а так же в изучении воздействия на пулы и потоки различных факторов как естественного, так и антропогенного происхождения. А.И. Уткиным [24] предложена

следующая структурная схема углеродного цикла в лесном биогеоценозе (рис. 1.1):

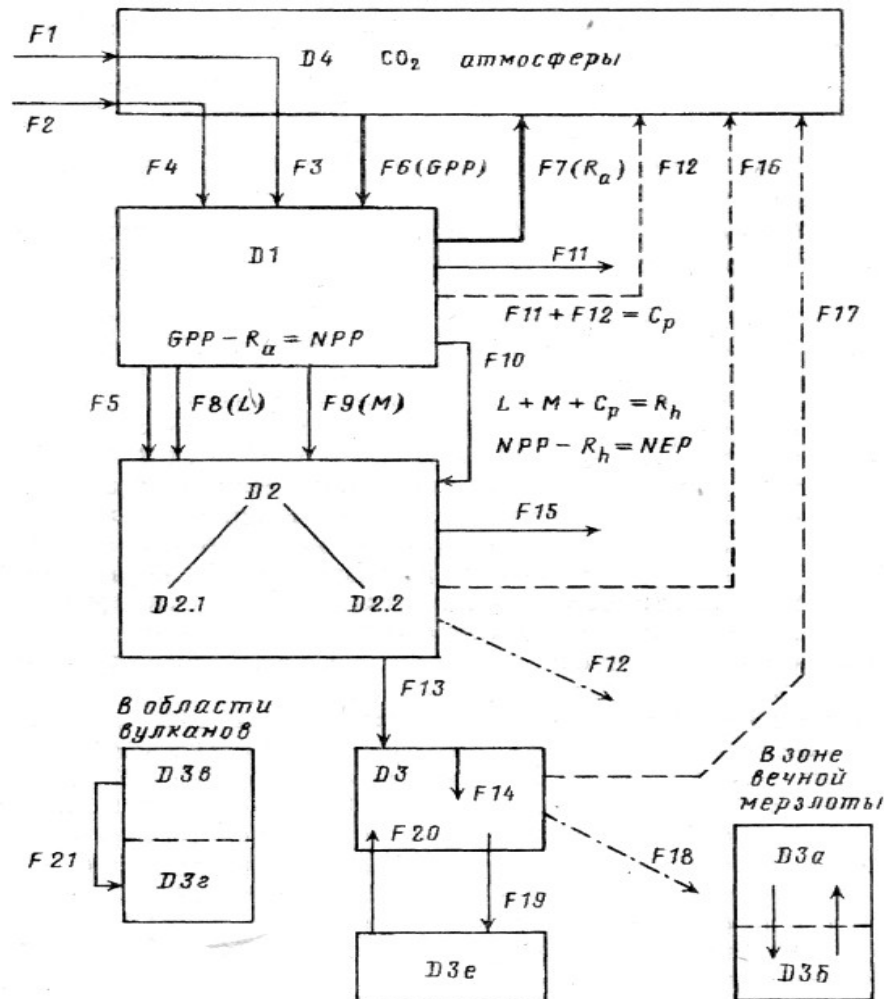


Рис. 1.1. Схема потоков углерода (преимущественно в форме органического вещества) в лесной экосистеме.

Депо углерода: D1 — в фитомассе, D2 — в фитодетрите (D2.1 — в лесной подстилке, D2.2 — в валеже и сухостое), D3 — в почве, D4 — CO₂ в атмосфере. *Потоки углерода:* F1 — F5 — потоки углерода связанные с геофизическими и геохимическими явлениями; F6 — ассимиляция CO₂, при поглощении ФАР, или полная первичная продукция (GPP); F7 — автотрофное дыхание растений (R_a); F8 — опад отмерших органов; F9 — отпад; F10 — опад и частично отпад фитомассы за счет потребления фитофагами; F11 — вторичная продукция фитофагов. F11 — F23 — потоки углерода, связанные с трансформацией органического вещества в вековые формы аккумуляирования.

Величиной, отражающей накопление биомассы в экосистеме, а, следовательно, и ее углеродный баланс, является нетто-экосистемная продукция (NEP). Она определяется [126], следующим образом:

$$NEP = GPP - (R_h + R_a) \pm A \quad (1.1)$$

где GPP – первичная брутто-продукция;
 R_h – гетеротрофное дыхание;
 R_a – автотрофное дыхание;
 A – латеральный внос – вынос.

Учитывая значительный объем работ при детальном изучении круговорота углерода, часто исследователи останавливаются только на какой-либо небольшой совокупности пулов и потоков, например, на накоплении углерода биомассой, почвой или мертвым органическим веществом.

Более половины запасов углерода континентальной биосферы приходится на почвы, и они являются одним из главных резервуаров стока углерода на континенте [127, 128]. Поэтому ряд исследований [129 – 163] сосредоточен на выяснении углеродной функции лесных почв. Установлены общие запасы углерода в лесных почвах различных растительных зон [140, 150, 151, 154, 157, 160, 164, 165], для некоторых типов почв выяснены особенности динамики накопления и разложения органического углерода [130, 132–134, 136–139, 141–143, 145, 148, 149, 152, 153, 156, 161, 162]. Установлена особая роль почв под бореальными лесами в поглощении углекислого газа [128, 129]. Мертвые органические остатки растений (мортомасса) являются значительным пулом углерода в лесных сообществах, особенно заметна их роль в формировании баланса углерода в лесах, не подвергающихся интенсивному лесохозяйственному воздействию. Однако имеющегося количества исследований по данной проблеме [166 – 176] недостаточно для точной оценки роли мортомассы в биологическом круговороте углерода.

Основным источником органического углерода в почве и в пуле мортомассы является древесный отпад и опад. Построение математической модели, способной достоверно описать динамику отпада деревьев сталкивается со значительными трудностями. Тем не менее, имеющиеся попытки, удовлетворительного описания вышеобозначенных процессов показывают основные направления научного поиска в данном направлении [177 – 179].

Заслуживают внимания исследования, посвященные углеродному балансу всего фитоценоза или только древесного яруса [180, 181]. Имеется довольно большое количество работ посвященных таким важным потокам углерода в лесном сообществе как фотосинтетический сток [182 – 188] и выделение в результате дыхания его биотических компонентов [189 – 194]. По

сути, геометрическая сумма всех этих потоков и определяет баланс углерода в биоценозе.

Леса являются не только объектом воздействия на климат, но и субъектом, чья жизнедеятельность во многом определяется погодно-климатическими условиями. Таким образом, мы имеем дело с системой прямых и обратных связей. Поэтому важными с точки зрения предсказания реакции лесных экосистем на грядущие глобальные изменения являются исследования зависимости CO_2 газообмена древесных растений от различных погодно-климатических показателей (температуры воздуха, насыщенности воздуха водяными парами, влагообеспеченности почвы, интенсивности солнечной радиации и пр.) и от изменения состава атмосферы [195 – 204]. Перспективными, являются модели баланса углерода, построенные на подобных данных [205, 206], которые отличаются довольно высокой точностью и универсальностью.

Исследования только отдельных составляющих углеродного цикла не могут дать полной картины. Однако, сопоставляя данные различных авторов, усредняя и комбинируя их, можно составить более или менее целостное представление, и определить наиболее необходимые направления дальнейших исследований.

1.4. О методических особенностях изучения круговорота углерода в лесных биогеоценозах

На данный момент наметилось несколько сильно отличающихся друг от друга подходов к исследованию баланса и накопления углерода в лесных экосистемах. Прежде всего, эти подходы необходимо разделить в соответствии с масштабами оценок.

Первая группа включает исследование запасов и динамики накопления углерода на довольно больших территориях: в масштабах регионов, государств, климатических зон, планеты в целом и т.п. При этом в расчет принимаются все лесные массивы или только определенная группа лесов или их отдельных компонентов, либо же вся растительность региона. Для таких развернутых исследований применяют аэрокосмическое наблюдение [105, 207, 208], либо используют созданные ранее карты растительного покрова [209], или данные лесоинвентаризации в той или иной форме [112, 210, 211]. Во всех случаях необходимы дополнительные данные, полученные при непосредственном исследовании конкретных насаждений, служащие для верификации полученной информации. Такие исследования проводят либо сами авторы [212], либо производится обобщения доступных литературных дан-

ных [210]. Barbara L. и др. [213] отмечают целесообразность использования результатов наблюдения за состоянием насаждений на пунктах техногенного мониторинга для расчета вклада лесов региона в углеродный баланс. Широкое распространение получили переводные коэффициенты, характеризующие связь между объемным запасом древесины в насаждениях и биомассой древостоя или отдельных его фракций [214, 215]. Оценка динамики углерода на больших территориях основана на ряде допущений, что снижает ее точность и вносит некоторую неопределенность в результаты [216]. С целью повышения точности крупномасштабных оценок необходимо проведение достаточно большого количества исследований в конкретных биогеоценозах.

Вторая группа подходов применяется при исследовании особенностей углеродного баланса в подобранных по определенному принципу насаждениях, с большей или меньшей подробностью.

На основании измеряемых параметров можно выделить два принципиально разных подхода к изучению баланса углерода в лесах:

1) Изучение газовой фазы составляющих баланса – основным измеряемым параметром является углекислый газ [124, 217, 218, 219]. Общий баланс его в лесном биогеоценозе определяется методом теплового баланса [220, 221, 222], или проводятся измерения потоков углекислого газа между отдельными компонентами, с помощью закрытых или открытых газоизмерительных систем [217, 223]. Данный методический подход отличается относительной простотой [224, 225], т.к. изучается только один показатель – поток углекислого газа. Однако он требует длительных и частых (несколько десятков раз в год) систематических или даже постоянных наблюдений и дорогостоящего оборудования. Л.К. Кайбияйнен и др. [226] отмечают, что прямые измерения потока CO_2 в растительном сообществе дают наиболее точные результаты. Большой скепсис по поводу рассматриваемого подхода высказывает А.И. Уткин [24]. Согласно исследованиям A.Guenther и др. [227], более 4% углерода, выделяемого лесными экосистемами в результате автотрофного дыхания и других физиологических процессов, входит в состав веществ отличных от углекислого газа, и не регистрируется описываемым методом. Поэтому такой подход, при кажущейся простоте интерпретации данных, может иметь существенные погрешности.

2) Изучение твердой фазы составляющих баланса основано на определении содержания органического углерода в отдельных пулах лесного биогеоценоза и изменения его содержания в них [228]. З.П. Мартынюк и др. [229] отмечают, что такой подход дает наиболее верную оценку баланса углерода в лесном сообществе.

По срокам и периодичности наблюдений можно выделить два

методических направления исследований углеродного баланса. Одни из них предполагают длительное изучение одного и того же сообщества и процессов, происходящих в нем. Обычно такие исследования требуют довольно продолжительных наблюдений, но дают уникальные данные, которые невозможно получить никаким другим способом.

Другое направление – сравнительное – основано на подборе насаждений относящихся к одному естественному ряду, но разным возрастным стадиям [228, 230, 231]. Это направление позволяет получить за сравнительно короткий промежуток времени удовлетворительное представление о возрастных изменениях накопления углерода биогеоценозом. Определенный интерес представляет подход В.А. Усольцева, позволяющий определить максимально возможный запас углерода в насаждении [232].

Существуют методы оценки участия биогеоценозов в фиксации атмосферной углекислоты, не укладывающиеся в вышеизложенную схему. Так имеется мнение [233, 234], что величина хлорофилльного индекса может использоваться для расчета величины стока углерода в экосистему.

Следует отдельно рассмотреть различные модели углеродного баланса в лесных сообществах. Такие модели часто дают знания, которые очень трудно получить любым другим методом, в течение нескольких минут узнать результаты естественного или антропогенного воздействия на накопление углерода, проследить динамику углерода на протяжении нескольких оборотов рубки и пр. Модели поведения углерода в лесной экосистеме не являются однородной группой, среди них можно выделить:

1. эколого-физиологические [235 – 238], в них моделируются процессы дыхания и фотосинтеза в зависимости от факторов внешней среды;
2. биопродукционные [239 – 242], моделируется изменение массы углерода в различных пулах с течением времени и под влиянием естественных и антропогенных факторов.

При изучении твердой фазы составляющих баланса углерода в лесных экосистемах одной из важнейших, и в тоже время трудоемких задач является определения массы отдельных компонентов биогеоценоза, ее изменений во времени, и переходов углерода из одних компонентов в другие по цепочкам круговорота. В дальнейшем, зная содержание углерода в этих компонентах, определяют показатели конкретного цикла углерода.

Прямой учет запаса биомассы в древостое требует огромной работы по взвешиванию большого количества деревьев и отдельных их фракций. Поэтому были разработаны выборочные методы, основанные на взвешивании среднего дерева или деревьев, отобранных по определенным правилам, которые разрабатывались на основе теории вероятности. Согласно этим методическим разработкам, для достижения достоверного результата на каждой

пробной площади для определения массы древостоя, требуется обработать несколько стволов, что при большом количестве пробных площадей так же требует значительных затрат. И вовсе не приемлем данный метод при проведении многолетних наблюдений на постоянных пробных площадях.

В последнее время все более набирает популярность метод определения биомассы и запаса углерода в насаждении с использованием аллометрических уравнений. Они связывают между собой массу деревьев или их фракций с другими, легко определяемыми, признаками дерева или древостоя (высота, диаметр на высоте груди, диаметр и протяженность кроны, возраст, бонитет, густота насаждения и т. п.) [243 – 258]. Основан данный методический подход на наличии физиологически обусловленных, более или менее тесных, корреляций между отдельными свойствами организма. Это объясняется системным ответом живого организма на воздействие факторов внешней среды, т.е. в ответ на определенное воздействие изменяется не одно отдельное свойство организма, а все его подсистемы. Причем изменения во всех подсистемах происходят согласовано друг с другом. Наличие данного явления позволяет нам с той или иной степенью вероятности по величине одного или нескольких признаков предсказать величину других.

Данное свойство живых организмов легло в основу ряда методических подходов определения биомассы. Так Китреджем выдвинуто предложение о возможности определения массы отдельных фракций древесных растений на основании их диаметра, включенного в показательную функцию [259]. Далее, его идея была развита, и наравне с диаметром в показательное уравнение предложено включать высоту [260], а также другие показатели, что несколько повышало точность определения.

Группа японских исследователей (Шинозаки и др. [261]), а позднее и их последователи [262, 263] подвели физиологическую основу под метод определения биомассы кроны и отдельных ее частей, на основании морфометрических признаков. Согласно выдвинутой ими теории (пайп-модель) определенную площадь листовой поверхности снабжает водой определенное количество проводящих сосудов или трахеид, т.е. площадь, а значит и масса листовой поверхности, находятся в функциональной зависимости от площади заболонной древесины на поперечном срезе ствола. И это положение применимо как к кроне в целом, так и к отдельным побегам. Далее было выдвинуто предположение о том, что ствол в основании кроны не имеет ядровой древесины, и проводит по всей площади, т.е. его площадь в данном месте равна площади заболонной древесины [263, 264], и она одинакова на всем протяжении ствола под кроной. Эта гипотеза получила большое количество практических подтверждений [265 – 270]. Было установлено, что связь между

массой кроны (отдельно листвы и ветвей) и площадью заболони не зависит от места произрастания, возраста дерева и других признаков.

Однако площадь ствола в основании кроны является, с точки зрения измерения, низкотехнологичным показателем и сложность ее определения возрастает, с увеличением высоты ствола. Поэтому целесообразен рекурсивный подход определения биомассы кроны [271]. Последняя определяется на основании пайп-модели, а диаметр ствола у основания кроны определяется на основании его диаметра на высоте груди, и таких уточняющих параметров, как возраст и характеристика условий произрастания (класс бонитета). В итоге модель мало теряет в точности, но приобретает значительное упрощение в ее применении. В.А. Усольцев отмечает, что данный методический подход незаменим при проведении наблюдений на постоянных пробных площадях [263]. Chiba Yukihiro [272] указывает, что довольно точными для оценки биомассы фракций дерева являются уравнения, включающие площадь его поперечного сечения.

Такое свойство фитомассы делает возможным применить найденные на достаточно большой выборке модельных деревьев зависимости для нахождения фитомассы и, соответственно, запасов углерода на различных пробных площадях, что позволяет значительно снизить материальные затраты, и время на проведение исследований, без потери точности. Естественно при сужении экологического размаха и географической представленности, точность моделей возрастает, но они становятся пригодными для меньшего количества случаев.

Согласно результатам, полученным рядом исследователей [271, 273 с. 56], биомасса кроны слабо детерминирована диаметром и высотой дерева. Масса хвои и ветвей зависит и от того, в какой части полога расположена крона изучаемого дерева, каков ее световой режим. Кроны, находящиеся в оптимальных световых условиях, как правило, имеют максимальную массу и обеспечивают дереву максимальное накопление биомассы, которая, в свою очередь, находится в тесной связи с радиальным приростом ствола. Поэтому В.А. Усольцев [263] и Н.Ф. Полякова [274] отмечают, что масса ассимилирующего аппарата находится в тесной связи с текущим объемным приростом, и предлагают в уравнения, предназначенные для определения массы кроны добавить средний радиальный прирост за определенный промежуток лет. В частности В.А. Усольцев [263] находит наиболее целесообразным для определения массы хвои сосны использовать средний прирост за пять лет, а для определения массы ветвей за десять.

Ни один из рассмотренных выше подходов в отрыве от других не может дать исчерпывающей информации о накоплении и особенностях круговорота углерода в лесу, в то время как умелое их сочетание позволит глубже вник-

нуть в суть происходящих процессов. Поэтому при исследованиях применяется комбинация этих методов, дающая более полные и обоснованные результаты [275].

Выводы

1. Растительные сообщества, главным образом лесные, способны поглощать избытки CO_2 из атмосферы, и тем самым предотвращать развитие «парникового» эффекта. К настоящему моменту накоплен определенный набор оценок участия лесных фитоценозов в глобальном и региональном углеродном цикле.
2. При изучении баланса углерода в лесных фитоценозах целесообразно выделить функционально единых пулов органического углерода и потоков, посредством которых осуществляется обмен между пулами и с окружающей средой, ибо только полный учет всех пулов и потоков способен дать правильное представление о балансе углерода.
3. В соответствии с исследованиями глобального, регионального или локального характера современные методические подходы к изучению круговорота углерода в лесных биогеоценозах должны составлять самостоятельные группы. В том числе, в отдельную группу следует выделить исследования баланса углерода, осуществляемые при помощи эколого-физиологических или биопродукционных моделей.
4. Является необходимым проведение детальных исследований формирования баланса углерода в различных лесных насаждениях, динамики поглощения им углерода из атмосферы и накопления его в органическом веществе, а так же разработки теоретических основ создания углероддепонирующих плантаций.

ГЛАВА 2

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ.

ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Физико-географическая характеристика региона исследования

Рельеф и почвы. Согласно геоморфологическому районированию регион исследования расположен на западе Восточно-Европейской платформы, в подзоне широколиственных лесов, провинции – Белорусское Полесье [276]. Складочно-блочный кристаллический фундамент, сложенный гнейсами, кристаллическими сланцами, гранитами, диоритами и другими породами, залегает на глубине 450 – 550 м ниже уровня моря. Территория до конца палеогена подвергалась чередованию морских и континентальных условий.

Платформенный чехол состоит из отложений палеозойской, мезозойской и кайнозойской групп. Формирование рельефа проходило при периодической смене суши и моря. В антропогене территорию покрывали мощные толщи льда Березинского и Днепровского оледенений. Значительную роль в формировании рельефа играли талые воды, пергляционные, эрозийно-денудационные и отчасти биогенные процессы. В последние десятилетия усиливаются изменения рельефа обусловленные антропогенными факторами.

Территория региона исследований представлена на севере пологоволнистой, водноледниковой равниной, а в центральной и южной части широкой террасированной долиной рек Днепра, Сожа и Припяти. Реки, протекающие по территории региона исследований, относятся к Черноморскому бассейну. Все они равнинного типа, характеризуются медленным течением и большой извилистостью.

Сложный рельеф, наличие больших массивов лесов и болот, рек, а также климатические условия района наложили свой отпечаток на почвообразовательные процессы. В целом, выделятся четыре основных процесса почвообразования: дерновый, подзолистый, дерново-подзолистый и болотный. Преобладают различные подтипы дерново-подзолистых почв (77%), гораздо меньше дерновых (около 7%), торфяно-болотные почвы занимают 8% территории региона исследований. По механическому составу почвообразующих пород наиболее представлены пески связанные (80% всех минеральных почв), супеси рыхлые (13%) и пески рыхлые (6%). Гидроморфные почвы наиболее представлены торфяно-болотными почвами низинного типа болот. По уровню pH на лесных землях преобладают сильнокислые и очень сильнокислые почвы. Этот факт объясняется породным составом насаждений, которые по своим биологическим особенностям подкисляют почву (сосна,

ель). В последнее время на реакцию почв стали оказывать влияние кислото-загрязняющие атмосферные осадки.

Климат региона исследований. Существенное влияние как на видовой состав древесных и подпологовых видов растений, так и на производительность насаждений оказывают климатические условия. Согласно климатическому районированию территория Беларуси входит в Западный район Центральной климатической области европейской части бывшего СССР [277]. А.А. Григорьев и М.И. Будыко [278] относят Беларусь к зоне влажного климата с теплым летом и умеренно мягкой зимой. Климат региона исследований теплый, неустойчиво-влажный, наиболее континентальный в Белоруссии. Среднегодовой радиационный баланс составляет около $40 \text{ ккал} \cdot \text{см}^{-1}$. Преобладающие потоки воздуха приносят атлантический воздух умеренных широт, проникновение которого связано с циклонической деятельностью на полярном и арктическом фронтах. При прочих направлениях ветров в соответствии с сезоном года возможно проникновение континентальных умеренных, арктических или тропических воздушных масс. О континентальности климата свидетельствует амплитуда температур самого теплого – июль и самого холодного – январь месяцев, достигающая 25°C (табл. 2.1).

Вегетационный период продолжается 193 – 199 дней, период активной вегетации (среднесуточная температура выше 10°C) 152 – 153 дня. Характерной особенностью климата района является высокая теплообеспеченность: сумма положительных температур за вегетационный период составляет $2730 - 2740^\circ$, тетротерма по Майеру (средняя температура за май – август) равна $16,6^\circ$, в сочетании с небольшим количеством выпадающих осадков. Коэффициент увлажнения по Иванову, за теплый период колеблется в пределах $0,85 - 0,90$. Средний дефицит влажности за май – июль составляет $7,2 - 7,5 \text{ мб}$.

Устойчивый снежный покров лежит 100 – 110 дней, средняя мощность около 23 см. Максимальная средняя глубина промерзания почвы в поле свыше 70 см, в лесу она значительно меньше. Средняя продолжительность снеготаяния около 20 дней. Снег начинает таять в конце февраля – начале марта. Последние заморозки в воздухе весной приходятся на 25 – 30 апреля, но от поздних заморозков не гарантирован весь май и даже начало июня. Первые заморозки осенью наступают в последние дни сентября – в начале октября [279].

Таблица 2.1

Характеристика основных климатических факторов региона исследований

Месяцы	Температура воздуха, °С			Средняя температура поверхности почвы, °С	Кол-во осадков, мм	Снежный покров, см	Относительная влажность воздуха, %	Ветры	
	средние много-летние	абсолютные						направление	скорость, м/сек
		max	min						
Январь	-4,2	+8	-35	-7	92,5	16	86	ЮЗ	4,6
Февраль	-3,6	+11	-35	-6	29,4	23	84	ЮЗ	4,5
Март	0,7	+21	-34	-2	25,7	20	80	ЮЗ	4,4
Апрель	8,1	+29	-14	+7	33,7	-	72	Ю	4,1
Май	14,3	+32	-5	+16	45,8	-	66	СЗ	3,8
Июнь	18,2	+35	+6	+20	53,9	-	68	СЗ	3,5
Июль	19,4	+36	+6	+22	83,1	-	70	СЗ	3,3
Август	18,0	+37	+2	+19	86,1	-	74	З	3,1
Сентябрь	12,6	+32	-4	+13	61,5	-	78	ЮЗ	3,3
Октябрь	6,7	+26	-20	+6	68,1	-	82	Ю	3,8
Ноябрь	-0,2	+23	-32	+1	49,9	2	88	ЮВ	4,3
Декабрь	-4,0	+11	-35	-5	45,0	6	88	Ю	4,3
Средние за год	7,2	+37	-35	+7	674,7	23	78	ЮЗ	3,9

Растительный покров региона исследований. Согласно геоботаническому районированию регион исследований относится к подзоне широколиственно-сосновых лесов, Полесско-Приднепровскому геоботаническому округу. Всего здесь насчитывается около 1200 видов сосудистых растений. Современная флора региона характеризуется миграционным происхождением и складывается из комплекса сравнительно молодых миграционных элементов, проникших на его территорию из разных районов Евразии. Формирование флоры, очевидно, происходило в два этапа (в плейстоцене и голоцене) [280].

Леса расположены неравномерно: крупные лесные массивы чередуются с мелкими, обособленными среди сельскохозяйственных угодий. Хвойные насаждения произрастают главным образом в суходольных типах лесорастительных условий. В регионе исследований *Pinus silvestris* L. является преобладающей древесной породой. В Полесско-Приднепровском геоботаническом округе она занимает 63,0% площади земель, покрытых лесами, что несколько выше, чем в среднем по республике [281]. Формация еловых лесов представлена слабо, всего 0,1%. К коренным широколиственным лесам относятся дубовые и ясеневые насаждения. Распространены мелколиственные леса: березняки, черноольшанники и осинники [282, с. 131]. Обобщенный анализ типологической структуры показывает, что наиболее распространенной является группа мшистых типов леса (около 42%), следующими по представленности являются черничная, орляково-зеленомошная и кисличная.

Амплитуда эдафических условий произрастания сосновых лесов весьма широка – от крайне сухих песчаных почв до болот. В возрастной структуре по региону исследований преобладают насаждения сосны II и III класса возрастов (по суходолу), спелые и перестойные насаждения составляют чуть больше 5% [281]. Средний возраст сосновых насаждений 37 лет. Около половины площади сосновых лесов в регионе исследований занимают насаждения II бонитета. Вторую и третью позиции занимают соответственно древостои растущие по III и I бонитетам. Средняя полнота сосновых древостоев – 0,71. Исходя из анализа средних запасов древесины по классам возраста, можно заключить, что сколько-нибудь существенное накопление запасов происходит до IV класса возраста, достигая $205 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$. Средний запас составляет $122,9 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$, а среднее изменение запаса за год $3,3 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$.

Антропогенная трансформация региона исследований. Воздушный бассейн Республики Беларусь испытывает антропогенную нагрузку, как от региональных источников, так и вследствие трансграничного переноса. Особенности географического положения Беларуси обусловили резкое преобладание в составе атмосферных выпадений трансграничной составляющей,

доля трансграничной серы в выпадениях составляет 84-86%, окисленного азота - 89-94%, восстановленного азота - 38-65%. На территории Беларуси основными источниками загрязнения атмосферного воздуха являются автотранспорт, объекты энергетики и промышленные предприятия. Ими в 2000 г. выброшено в атмосферу 1311,3 тыс. т загрязняющих веществ. Большая часть из них произведена передвижными источниками – 72,7%. В составе выбросов преобладали оксид углерода – 54,7%, диоксид серы – 10,7%, оксиды азота – 10,3% и углеводороды – 18,4%. Содержание сернистого ангидрида в составе атмосферы в окрестностях г. Гомеля составляло в 1991 – 1999 гг. 0,001 – 0,003 мг/м³, а диоксида азота 0,001 – 0,004 мг/м³.

Промышленные предприятия в регионе исследований оказывают существенное влияние на прилегающие лесные массивы. Крупнейшими центрами промышленных эмиссий являются Гомельский, Мозырский, Светлогорский и Жлобинский промышленные узлы. Среди предприятий региона исследований в 2000 г. наибольший объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу имел место на Мозырском нефтеперерабатывающем заводе – 19,4 тыс. т. По г. Гомелю в целом на 1980 г. выбрасывалось 66,9 тыс. т/год загрязняющих веществ [283], в 1985 г. эта цифра составляла 50 тыс. т/год, в 1990 – 31,0 тыс. т/год, а в 1993 только 21,6 тыс. т/год. Анализ динамики выбросов показывает, что в последние годы в Республике Беларусь имеет место тенденция к снижению объемов выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, так, с 1985 по 2000 гг. объем выбросов серы уменьшился на 82,1%, а оксидов азота – на 40,3%.

Леса региона исследований в 1986 г. в значительной части подверглись радиоактивному загрязнению в связи с аварией на Чернобыльской АЭС.

Являясь одним из главнейших факторов стабилизации экологического состояния воздушной, водной и наземной среды, лес воспринимает на себя часто непомерные действия вредных антропогенных и природных факторов. Ухудшение экологического состояния лесов приводит не только к потере источников сырья и предметов потребления, но и к снижению объема их невосполнимых полезностей.

2.2. Программа исследований

Для достижения поставленной цели и задач научно-исследовательская работа проводилась по следующей программе:

1. Подбор и закладка опытных объектов.

2. Разработка методической базы для определения запасов углерода древесной растительности.
3. Изучение особенностей накопления и распределения органического углерода в основных компонентах сосновых фитоценозов.
4. Исследование особенностей выделения углекислого газа почвой и мёртвой массой лесных экосистем.
5. Построение имитационной модели динамики накопления углерода в древесных компонентах сосновых фитоценозов.
6. Разработка рекомендаций по созданию и ведению хозяйства в сосновых насаждениях созданных с целью снижения содержания в атмосфере углекислого газа.

2.3. Объекты исследования

Объектами исследований послужили сосновые насаждения, произрастающие в условиях Полесско-Приднепровского геоботанического округа. Для проведения исследований заложено 38 постоянных (срок наблюдения до 15 лет) и 25 временных пробных площадей. Таксационные описания насаждений на постоянных и временных пробных площадях приведены в приложении I.

Объекты исследования представлены чистыми и с незначительной примесью других пород насаждениями сосны обыкновенной искусственного происхождения. Среди объектов преобладают насаждения мшистого типа леса, а также представлены сосняки черничные (6 объектов) и орляковые (4 объекта), что, в общем, отображает типологический состав сосновых культурценозов в регионе исследования.

Исследуемые насаждения расположены на различном удалении от крупных промышленных центров (Гомеля, Мозыря, Светлогорска), и, поэтому, испытывают неодинаковый техногенный пресс. Так 7 объектов находятся в условиях очень сильной комплексной техногенной нагрузки (в зоне деградации древостоев), 19 в зоне сильной техногенной нагрузки, а 37 пробных площадей в зоне средней и слабой техногенной нагрузки.

В связи с тем, что лесные экосистемы региона исследования в значительной степени пострадали от атомной аварии на Чернобыльской АЭС на территории с плотностью загрязнения почвы радиоцезием $15 - 40 \text{ Ки/км}^2$ расположено 2 объекта исследования, $5 - 15 \text{ Ки/км}^2$ – 6 объектов исследования,

1 – 5 Ку/км² – 32 объекта исследования, 5 – 15 Ку/км² – 25 объектов исследования.

Наиболее представленными оказались насаждения II и III классов возраста, I^a и I бонитетов (рис. 2.2).

Таблица 2.2.

Особенности распределения объектов исследования по классам возраста и классам бонитета

Класс возраста	Класс бонитета		
	I ^a	I	II
I	1	1	1
II	7	6	3
III	10	12	2
IV	4	8	5
V	2	1	2

Совокупность заложенных пробных площадей и их распределение по классам бонитета, возрасту насаждения, типам леса и уровню техногенного пресса должна обеспечить получение репрезентативных и достоверных данных по динамике накопления углерода и характеру его распределения в компонентах сосновых фитоценозов искусственного происхождения в пределах региона исследований.

2.4. Методика исследований

Для разрешения основных программных вопросов необходимо сочетание полевых работ на пробных площадях заложенных в сосняках искусственного происхождения, лабораторных экспериментов и камеральной обработки результатов.

В комплекс работ на постоянных и временных пробных площадях входило:

1. Закладка пробной площади.
2. Пересчет деревьев по 1 или 2 сантиметровым ступеням толщины на временных пробных площадях. На постоянных - ежегодные замеры окружности ствола на высоте 1,3 м, с последующим расчетом диаметра.
3. Замер высоты 25-30 деревьев для определения средней высоты насаждения и распределения деревьев по высотам (на постоянных пробных площадях проводилось раз в 2 – 3 года).

4. Отбор и полевая обработка модельных деревьев сосны для расчетов запаса биомассы и углерода в древостое.
5. Проведение измерений, необходимых для определения запаса биомассы и углерода в подпологовой древесной растительности.
6. Отбор и полевая обработка модельных экземпляров деревьев и кустарников для расчета запаса биомассы и углерода подпологовой древесной растительности.
7. Определение запаса биомассы травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов. Отбор образцов для лабораторного определения влажности и содержания углерода.
8. Определение запаса подстилки. Взятие образцов для лабораторного определения влажности и содержания углерода.
9. Взятие образцов минеральной части почвы для определения объемного веса, влажности и содержания органического углерода.

Лабораторные работы включали в себя определение физико-химических свойств почвы и расчет содержания в ней органического углерода. А также камеральную обработку модельных экземпляров деревьев и подпологовой древесной растительности и математическую обработку полученных результатов.

Закладка пробных площадей проводилась в соответствии с рекомендациями, изложенными в “Программе и методике биогеоэкологических исследований” [243]. На пробных площадях размером 0,2 – 0,4 га проводился сплошной перебор деревьев с обмером окружности стволов, для последующего пересчета окружностей в диаметры. На основании перебора и графиков высот рассчитывались таксационные характеристики древостоев. Таксационные характеристики (возраст, средняя высота и диаметр, бонитет, полнота, запас и прирост) определялись исходя из методических рекомендаций Н.П. Анучина [284], В.С. Мирошникова и др. [285]. Тип леса и ассоциация уточнялись согласно И.Д. Юркевичу. [286, 287].

Основанием для определения уровня техногенного загрязнения послужили рекомендации В.В. Степанчика и др. [288], выделяющих следующие зоны комплексного воздействия токсикантов на природные экосистемы:

- *Зона деградации древостоя.* Уровень нагрузок по сернистому ангидриду, окислам азота, и пыли оценивается, как очень высокий или очень высокий для одного из них и высокий для остальных, средний возраст хвои 1,3 – 1,4 года, дефолиация 45 – 60%.

- *Зона сильного воздействия.* Уровень нагрузки пылью высокий, сернистым ангидридом и окислами азота – средний, средний возраст хвои 1,4 – 1,7 лет, дефолиация 35 – 45%.
- *Зона среднего воздействия.* Уровень нагрузки пылью высокий, окислов азота средний, а сернистым ангидридом - низкий, средний возраст хвои 1,7 – 2,0 лет, дефолиация 25 – 35%.
- *Зона слабого воздействия.* Уровень нагрузки окислами азота и пылью средний, сернистым ангидридом низкий, средний возраст хвои 2,0 – 2,9 лет, дефолиация 15 – 25%.

Работы по определению органической массы вели в период, когда заканчивался прирост надземных частей дерева, а именно с 10 – 15 августа до конца октября. Выбор модельных деревьев и их обработка проводилась с учетом апробированных методик [263, 289, 290, 291, 292]. Модельные деревья для изучения фракционного состава биомассы и массы углерода отбирались в типичных насаждениях разного возраста, при этом в каждой возрастной группе выбирали деревья различных классов роста. Модельные деревья тщательно отбирались поблизости от пробных площадей, так, что бы они были средними для соответствующего класса роста, по форме и габитусу кроны и по охвоению. При определении фитомассы деревьев выделяли следующие фракции: древесину ствола, кору ствола, древесину и кору ветвей, хвою.

Со спиленного модельного дерева брали образцы для определения влажности толстых (неохвоенных) частей ветвей и сухих ветвей (в трехкратной повторности из верхней, средней и нижней частей кроны). Вес этих образцов колебался от 20 до 100 г, в зависимости от величины модели и части кроны, из которой их брали. Далее все ветви с дерева обрубали, делили на охвоенные (лапник), неохвоенные и сухие и взвешивали. Замеряли высоту прикрепления первого сухого сучка, первого живого сучка и начала кроны, а так же длину всего хлыста (высота дерева). Охвоенные ветви измельчали на мелкие отрезки длиной до 10 см, взвешивали и тщательно перемешивали на брезенте. Из этого лапника брали навеску на сушку в полиэтиленовые мешки в количестве 100% лапника при диаметре дерева до 12 см, 25% – при диаметре от 12 до 24 см и 10% – при диаметре свыше 24 см.

Навески лапника, взятые для сушки с целью определения соотношения между весом ветвей и хвои в лапнике и уложенные в холщовые мешки, высушивали в сушильном шкафу до воздушно-сухого состояния. После этого хвоя с ветвей опадала и их отделяли друг от друга. Эту операцию проводили на металлической сетке размером 1 X 0,5 м, имеющей размер ячеек 0,5 X 0,5 см. На основании соотношения полученных фракций между собой (хвоя и

тонкие ветви) в воздушно-сухом состоянии устанавливали свежий вес тонких ветвей и хвои. При этом допускалось, что соотношение между весом хвои и ветвей в свежесрубленном состоянии одинаково с ним в воздушно-сухом [293, с. 17].

Ствол дерева условно делили на двухметровые отрезки, из середины которых брали поперечные выпилы, т.е. их выпиливали с высоты 1–3–5 м и т.д. Для деревьев небольшой высоты они составляли менее 1 м. Кроме того, брали выпил с высоты 1,3 м. Эти выпилы в дальнейшем использовали для определения объема ствола (древесины и коры), а так же для определения прироста ствола, как по диаметру, так и по объему. Рядом с этими выпилами в четырех места ствола (на высоте 1,3 м, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ длины ствола) брали образцы (выпилы) для определения влажности древесины и коры, концентрации в них углерода и их объемного веса, а также для установления соотношений между весом древесины и коры в стволе. Выпилы брали целиком, если их диаметр не превышал 16 см или в виде сектора, с тем, чтобы в него входили все годовичные кольца данного выпила. Кору с этих выпилов немедленно обдирали и взвешивали ее и древесину. Ствол вместе со всеми выпилами взвешивали.

Массу корней определяли расчетным методом [294]. Сопоставление результатов полученных расчетным методом с натурными измерениями фитомассы фракции корней в культурах сосны, произрастающих в центральной части Беларуси [295] показало, что разница между ними не превышает 7%.

На основании данных, полученных в результате обработки модельных деревьев, находились аллометрические зависимости массы отдельных фракций от таких признаков дерева, как диаметр на высоте груди, высота ствола, средний радиальный прирост за несколько последних лет, возраст. Используя эти функции и результаты ежегодных обмеров деревьев на пробных площадях, находили запас углерода в отдельных фракциях всех деревьев и древостоя в целом.

На пробной площади в случайном порядке закладывалось 10 – 15 учетных площадок 2х2 м для определения запаса древесной подпологовой растительности. На каждой площадке измерялся диаметр экземпляров подроста и подлеска на высоте 0,5 м, с разбивкой по видам.

Из наиболее типичных экземпляров отбирались модельные образцы для дальнейшего расчета запаса биомассы и углерода. В фитомассе подроста и подлеска выделяли следующие фракции: ствол, корни и листья. Определялась длина стволика и его диаметр на высоте 50 см. У модельных деревьев и кустарников лиственных пород листву обрывали полностью. Сразу же после рубки дерева все облиственные части ветвей отделяли от ствола и взвешивали. Листовую массу деревьев определяли как разницу

между весом облиствленных ветвей и ветвей с оборванными листьями, так как при определении веса листьев их непосредственным взвешиванием неизбежны ошибки из-за потерь в весе. Они вызваны транспирацией в процессе обрывания листьев длящегося при анализе крупных моделей несколько часов. Масса корней определялась у средних экземпляров методом раскопки. У кустарников она распределялась по стволикам прямо-пропорционально массе.

Запас живого напочвенного покрова определяли посредством укусов с 15 – 20 площадок размером 1 x 1 м в конце периода вегетации. Травяно-кустарничковые растения срезали непосредственно у поверхности почвы. Срезанные покрытосеменные растения и сухая трава, мхи, листья, хвоя разбирались по видам. Подземную массу учитывали методом монолитов, взятых из основных форм микрорельефа в 10-кратной повторности с площадок 20 x 20 см, на глубину 25 – 30 см.

Сырая масса подстилки определялась на десяти случайно заложенных учетных площадках размером 1x1 м по стандартной методике [243]. Бралось несколько усредненных образцов для определения влажности подстилки и содержания органического углерода.

Взятие образцов почвы на определение влажности, объемного веса и содержания органического углерода проводилось по общепринятым в почвоведении методикам [296] в 10-кратной повторности.

Влажность образцов биологических объектов и почвы определялась в лаборатории по стандартной методике [296]. Образцы взвешивались и помещались в сушильный шкаф, где выдерживались при температуре 105 °С. Периодическим взвешиванием высушиваемых образцов определялся момент достижения абсолютно сухого состояния. После остывания в эксикаторе образцы взвешивались, и вычислялась их первоначальная влажность и доля сухого вещества. Влажность всех частей биомассы определялась по формуле:

$$H = \frac{a - b}{b} \cdot 100\% \quad , \quad (2.1)$$

где H – влажность соответствующей части биомассы в процентах от ее веса в абсолютно сухом состоянии;
 a – масса навески в свежем состоянии;
 b – масса навески в абсолютно сухом состоянии.

Содержание органического углерода определялось методом мокрого озоления [296, 297].

Годичный радиальный прирост ствола определяли по спилам с помощью бинокулярного микроскопа МБС-10 с точностью 0,1 мм.

Изучение особенностей выделения углекислого газа проводилось в лабораторном опыте. Образцы древесного отпада, лесной подстилки и почвы отбирались на постоянных пробных площадях. От каждого ствола деревьев отпада бралось несколько пробных образцов. Интенсивность выделения CO_2 изучали при помощи камеральных опытов, в разработке схемы которых использовались рекомендации В.Л. Вознесенского и др. [298], Д.Г. Звягинцева [299], Л.И. Инишевой и Т.В. Дементьевой [300], И.А. Турлюна [301], Heath L.S. и др. [302] и Y. Beck [303]. Суть опыта заключалась в следующем: образцы, объемом 1,1–1,7 дм³ помещались в герметично закрывающиеся камеры, объемом 8 л. Камеры имели два отверстия, соединенные полихлорвиниловыми шлангами с инфракрасным газоанализатором Anagas CD 95 по замкнутой схеме. Перед помещением объекта в камеру он взвешивался, и рассчитывалась его влажность. Затем камера термостатировалась при заданной температуре. Через равные промежутки времени (обычно 5 минут) воздух из камеры прокачивался через газоанализатор, и определялось содержание в нем двуокиси углерода. Время экспозиции зависело от интенсивности продуцирования CO_2 , обычно она прекращалась, когда содержание данного газа повышалось на 300 – 400 % от первоначального. Как показали наши исследования [304], даже более существенное повышение концентрации CO_2 не влияло на скорость его выделения. Для набора необходимого количества данных опыт повторялся при различных температурных режимах ($t = 5 - 30\text{ }^\circ\text{C}$) и различной влажности ($W = 10 - 85\%$).

На основании полученных экспериментальных данных с помощью уравнения Менделеева - Клапейрона, определялась интенсивность выделения CO_2 (2.2):

$$U = 5,3 \cdot (8 - V_{\text{об}}) \cdot a \cdot \frac{P}{T}, \quad (2.2)$$

где: U - интенсивность выделения CO_2 , мг $\text{CO}_2 \cdot \text{час}^{-1}$;

a – скорость процентного изменения содержания CO_2 в воздухе камеры, % $\text{CO}_2 \cdot \text{час}^{-1}$;

5,3 – постоянный коэффициент;

$V_{\text{об}}$ – объем объекта, л;

$(8 - V_{\text{об}})$ – свободный объем камеры, л;

P - атмосферное давление, мб.;

T – температура, $^\circ\text{K}$.

Далее определялась интенсивность выделения CO_2 исследуемыми объектами на единицу массы (удельная интенсивность) (2.3).

$$U_{\text{уд}} = \frac{U}{m_{\text{сух}}}, \quad (2.3)$$

где $U_{\text{уд}}$ - удельная интенсивность выделения CO_2 , $\text{мг CO}_2 \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}$;

$m_{\text{сух}}$ – масса объекта в абсолютно сухом состоянии, г.

Полученные экспериментальные данные использовались для построения моделей интенсивности выделения углекислого газа в зависимости от гидро-термических условий.

Математическая и статистическая обработка первичных данных производилась с использованием программных пакетов Microsoft Excel и Statistica 5.5 (StatSoft). Для расчета средних арифметических величин, характеристики их вариации и достоверности полученных результатов использовался модуль BasicStatistics (Statistica). Оценка линейных регрессионных уравнений проводилась в модуле General Stepwise Regression, в котором поиск наилучшего сочетания предикторов проводится пошаговым методом, а поиск коэффициентов уравнения – методом наименьших квадратов. Модуль Nonlinear Estimation использовался для оценки коэффициентов нелинейных уравнений, для чего использовался метод Levenberg-Marquardt. Коэффициенты всех уравнений, приводимых в работе достоверны на уровне значимости 5%. Реализация имитационной модели осуществлялась в визуальной среде проектирования Delphi.

Выводы

1. Климат региона исследований теплый, неустойчиво-влажный. Среднегодовая температура воздуха составляет $7,2^{\circ}\text{C}$, продолжительность вегетационного периода 193 – 199 дней. Коэффициент увлажнения по Иванову, за теплый период колеблется в пределах 0,85 – 0,90.
2. Согласно геоботаническому районированию регион исследований относится к подзоне широколиственно-сосновых лесов, Полесско-Приднепровскому геоботаническому округу. Леса с главной породой *Pinus silvestris* L занимают 63,0% лесопокрытой площади. Обобщенный анализ типологической структуры показывает, что наиболее распространенной является группа мшистых типов леса (около 42%). Средний возраст насаждений сосны 37 лет. Средний запас в них составляет $122,9 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$, а среднее изменение запаса за год $3,3 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$.

3. Лесные массивы в регионе исследований находятся в зоне влияния атмосферных загрязняющих веществ. Значительная их часть подверглась радиоактивному загрязнению в связи с аварией на Чернобыльской АЭС.
4. Применение комплекса общепринятых методов для определения таксационных показателей сосновых насаждений, расчета биомассы и запаса углерода, математической обработки данных позволяет получить достоверные характеристики исследуемых насаждений и формирования в них запасов углерода.

ГЛАВА 3

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАПАСА УГЛЕРОДА В КОМПОНЕНТАХ СОСНОВЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ

3.1. Содержание углерода в компонентах соснового фитоценоза

Углерод является одним из органогенных элементов. Считается [306, с. 29], что жизнь своим возникновением и развитием обязана уникальным свойствам атома углерода. Он входит в состав всех без исключения органических веществ. И, как правило, его доля в их составе довольно велика – в среднем около половины. Не являются исключением и биотические компоненты лесных биогеоценозов, основу которых составляют растения, главным образом древесные. Преобладающим органическим веществом у древесных организмов является целлюлоза, концентрация углерода в которой составляет около 45%. Опад и лесная подстилка, как производные живых органических компонентов так же сохраняют в своем составе значительную долю углерода. Существенно ниже его содержание в минеральной части почвы, однако почвенный пул тоже играет существенную роль в биологическом круговороте этого элемента.

Выявление роли лесного биогеоценоза в балансе углерода требует получения точных данных о содержании этого элемента в отдельных структурных элементах экосистемы и о связи его содержания с различными факторами окружающей среды. С этой целью было проведено изучение содержания углерода в древостое, подлеске, живом напочвенном покрове, опаде, лесной подстилке, древесном отпаде и почве. В качестве наиболее вероятных факторов, оказывающих влияние на содержание углерода, были выделены возраст насаждения и уровень техногенного загрязнения.

В древостое содержание углерода определялось в следующих фракциях: древесина ствола, кора ствола, корни, ветви и хвоя. Экспериментальные данные (табл. 3.1) свидетельствуют о том, что, хотя и существуют некоторые отличия в содержании углерода в компонентах древостоев, относящихся к различным классам возраста, однако статистически они не достоверны, и влияние возраста насаждения на содержание углерода во фракциях древостоя не выявлено ($t_{05}=0,3 - 1,4 < t_{\phi}=2,1 - 2,3$). Здесь и в последующих таблицах указано максимальное значение t-критерия Стьюдента, получаемое при сравнении наиболее различающихся данных. Среднее содержание углерода в древесине ствола равно 50,19%, в коре ствола – 52,34%, в ветвях – 51,07%, в хвое – 46,45%, в корнях – 51,06%.

Таблица 3.1

Процентное содержание углерода в различных фракциях сосны обыкновенной ($t_{\text{ст}} = 2,1 - 2,3$)

Зона загрязнения	Возраст	Древесина ствола			Кора ствола			Ветки			Хвоя			Корни		
		\bar{x}	δ	t_{max}	\bar{x}	δ	t_{max}	\bar{x}	δ	t_{max}	\bar{x}	δ	t_{max}	\bar{x}	δ	t_{max}
Среднего	37	50,2 ₁	±0,05	1,1	52,31	±0,21	1,0	51,00	±0,12	0,9	46,21	±0,21	1,1	50,98	±0,0 ₉	1,3
	41	50,2 ₀	±0,08	0,9	52,52	±0,12	0,9	51,12	±0,13	0,9	47,00	±0,18	1,4	51,20	±0,1 ₁	0,7
	70	50,1 ₅	±0,07	0,8	52,12	±0,18	1,2	51,08	±0,11	0,9	46,23	±0,23	1,1	50,84	±0,1 ₂	0,6
Сильного	35	50,1 ₈	±0,10	0,9	52,46	±0,13	1,2	51,12	±0,08	0,9	46,65	±0,22	0,8	50,76	±0,0 ₆	1,3
	55	50,2 ₀	±0,06	0,8	52,14	±0,25	1,1	51,01	±0,15	0,6	46,12	±0,19	1,4	51,12	±0,0 ₈	0,4
	64	50,2 ₂	±0,08	1,1	52,51	±0,16	1,2	51,03	±0,18	0,3	46,58	±0,33	0,7	51,00	±0,1 ₀	1,2
Деградации	56	50,1 ₆	±0,05	1,1	52,64	±0,30	1,2	51,09	±0,04	0,4	46,61	±0,21	0,8	50,98	±0,1 ₂	0,4
	61	50,1 ₉	±0,04	1,0	52,13	±0,18	1,1	51,08	±0,09	0,5	46,32	±0,19	0,7	50,77	±0,1 ₁	0,6
	84	50,2 ₀	±0,05	1,1	52,23	±0,23	0,7	51,10	±0,11	0,8	46,33	±0,28	0,9	51,89	±0,0 ₈	1,3
Средняя		50,1 ₉	±0,02		52,34	±0,09		51,07	±0,04		46,45	±0,12		51,06	±0,0 ₅	

С целью определения воздействия техногенного загрязнения на содержание углерода во фракциях древесной фитомассы отобраны образцы на пробных площадях, находящихся под воздействием техногенной нагрузки разной степени интенсивности. Анализ полученных данных показывает, что техногенное воздействие не оказывает существенного влияния на концентрацию углерода во всех рассматриваемых фракциях древостоя (см. табл. 3.1).

Дополнительно установлено, что наименьшей изменчивостью отличается концентрация углерода в стволовой древесине, что, вероятно, объясняется бóльшим, по сравнению с остальными фракциями, постоянством состава веществ, входящих в древесину, и тем, что доля целлюлозы значительно преобладает над остальными веществами. Изменчивость концентрации углерода в ветках и корнях также невысокая. Наиболее вариабельна она в хвое, что можно объяснить сильной зависимостью химического состава хвои от почвенных условий и загрязнения окружающей среды. Необходимо отметить, что в отличие от большинства других жизненно важных элементов (азота, фосфора, микроэлементов и пр.), концентрация которых в составе различных фракций может изменяться в несколько раз [286], концентрация углерода варьирует не более чем на 2 - 3%.

Для анализа связи содержания углерода с положением дерева в пологе, деревья были разделены на три группы: прегосподствующие и господствующие; согосподствующие; угнетенные. Нами не установлено статистически значимой зависимости концентрации углерода от данного показателя. Однако наблюдается слабая тенденция к снижению содержания углерода в массе таких фракций, как древесина ствола, корни, ветки и хвоя при переходе от группы угнетенных деревьев к господствующим и прегосподствующим (табл. 3.2).

В связи с тем, что не обнаружено достоверной зависимости концентрации углерода во фракциях фитомассы от возраста насаждения, положения дерева в пологе и уровня техногенной нагрузки, можно утверждать, что она статистически постоянна в пределах рассматриваемых насаждений. Поэтому в дальнейших расчетах нами использованы среднеарифметические значения содержания углерода во фракциях, как наиболее репрезентативно отражающие содержание углерода в древостое. Полученные нами значения немного отличаются от оценок содержания углерода в составе фракций сосны сделанных другими авторами [116, 123], и от переводных коэффициентов, употребляемых для пересчета запаса фитомассы в запас углерода [126, 231, 254]. Таким образом, переводные коэффициенты можно рекомендовать только для ориентировочных предварительных расчетов. Для более точных оценок необходимо дополнительное исследование концентрации углерода в компонентах лесных сообществ в различных географических и экологических условиях произрастания.

Таблица 3.2

Зависимость содержания углерода в фитомассе различных фракций сосны
от положения дерева в пологе ($t_{\text{ст}} = 2,1 - 2,3$)

Положение в пологе	Древесина ствола			Кора ствола			Ветки			Хвоя			Корни		
	\bar{x}	δ	t_{max}	\bar{x}	δ	t_{max}	\bar{x}	δ	t_{max}	\bar{x}	δ	t_{max}	\bar{x}	δ	t_{max}
Господствующие и прегосподствующие	50,12	$\pm 0,09$	1,3	52,64	$\pm 0,25$	1,2	50,95	$\pm 0,12$	0,9	45,05	$\pm 0,22$	1,3	51,01	$\pm 0,07$	0,7
Согосподствующие	50,14	$\pm 0,12$	0,9	51,87	$\pm 0,36$	1,2	51,10	$\pm 0,09$	0,7	46,39	$\pm 0,48$	1,1	51,08	$\pm 0,08$	0,6
Угнетенные	50,31	$\pm 0,8$	1,3	52,51	$\pm 0,09$	1,1	51,16	$\pm 0,16$	0,9	47,91	$\pm 0,34$	1,3	51,09	$\pm 0,14$	0,7
Среднее	50,19	$\pm 0,02$		52,34	$\pm 0,09$		51,07	$\pm 0,04$		46,45	$\pm 0,12$		51,06	$\pm 0,05$	

Важную роль в углеродном цикле лесных сообществ играет древесный детрит. Содержание углерода в нем колеблется от 50 до 63% (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Содержание углерода в древесном детрите
в зависимости от срока его разложения

Срок разложения, лет	Содержание углерода, %	Доверительный интервал ($\alpha=0.05$)	Срок разложения, лет	Содержание углерода, %	Доверительный интервал ($\alpha=0.05$)
1	52,23	0,03	5	58,21	0,06
1	50,13	0,05	7	54,76	0,15
2	53,26	0,02	9	59,25	0,14
2	51,24	0,06	13	62,13	0,12
3	50,34	0,12	15	61,45	0,14
3	54,82	0,10	15	63,14	0,11
5	56,45	0,09	-	-	-

С увеличением срока разложения концентрация углерода увеличивается. Это явление хорошо описывается уравнением (3.1). Увеличение относительного содержания углерода, можно объяснить тем, что наиболее легко разрушаются микроорганизмами те органические соединения, содержание углерода в которых невысоко, но они насыщены азотом и кислородом. Затем минерализации подвергаются более углеродонасыщенные вещества [136, 294]

$$C = 50,91046 + 0,809556 \cdot A, \quad (3.1)$$

где C – содержание углерода в древесном детрите, %.
 A – срок разложения, лет.

При условии, что средний возраст валежа и сухостоя равен 6 лет [167], можно принять среднюю концентрацию углерода в древесном детрите равной 55,77% [305], согласно формуле (3.1).

Лесная подстилка способна накапливать значительные запасы углерода. Его концентрация в ней определяется двумя составляющими: концентрацией углерода в лесном опаде и скоростью минерализации органических веществ содержащих различную долю атомов углерода в своем составе. Концентрация углерода в опаде колеблется от 45 до 48% (табл. 3.4) и близка к концентрации углерода в хвое, составляющей основную массу опада.

Таблица 3.4

Содержание углерода в опаде и горизонтах подстилки ($t_{ст} = 2,1 - 2,3$)

Зона загрязнения	Возраст	Опад			A_0'			A_0''			A_0'''			Средневзвешенная концентрация углерода в подстилке		
		\bar{x}	δ	t_{max}	\bar{x}	δ	t_{max}	\bar{x}	δ	t_{max}	\bar{x}	δ	t_{max}	\bar{x}	δ	t_{max}
Среднего	37	48,3	0,10	0,9	45,7	0,12	0,6	40,0	0,21	1,5	37,1	0,42	2,0	41,0	0,37	1,3
	41	48,5	0,12	1,1	44,3	0,14	1,1	41,3	0,23	0,7	34,2	0,45	1,5	40,4	0,40	0,9
	70	47,4	0,09	0,6	46,2	0,15	1,6	39,5	0,14	0,8	35,2	0,38	1,6	42,3	0,27	1,6
Сильного	35	46,3	0,10	1,5	44,3	0,09	1,1	35,3	0,19	1,2	29,8	0,51	1,7	38,9	0,31	1,1
	55	48,5	0,12	1,7	46,8	0,07	1,4	37,8	0,23	1,1	35,1	0,37	1,1	42,2	0,25	1,4
	64	46,0	0,14	1,7	45,4	0,06	0,7	39,3	0,21	0,4	30,4	0,41	1,2	39,3	0,37	0,9
Деградации	56	48,3	0,10	1,2	43,9	0,08	1,4	43,1	0,43	1,1	28,7	0,52	2,0	41,2	0,34	1,4
	61	46,5	0,09	1,4	43,5	0,10	1,6	34,9	0,24	1,3	29,3	0,44	2,0	38,8	0,26	1,6
	84	45,0	0,08	1,3	44,9	0,12	0,9	35,3	0,45	1,5	31,8	0,37	1,7	39,5	0,39	1,1
Средняя		47,2	0,05		45,0	0,07		38,5	0,12		32,4	0,31		40,4	0,25	

С увеличением степени разложения, содержание углерода в лесной подстилке закономерно уменьшается от 43 – 46% до 28 – 37%. Средневзвешенная концентрация углерода в подстилке 40,4%, а в опаде 47,2%.

В результате статистического анализа полученных данных (см. табл. 3.4) установлено, что достоверная связь между концентрацией углерода в опаде и подгоризонтах подстилки с возрастом насаждения и уровнем техногенной нагрузки отсутствует ($t_{05}=0,6 - 2,0 < t_{\phi}=2,1 - 2,3$). (см. табл. 3.4).

Концентрация органического углерода в почве резко падает с глубиной (табл. 3.5) при незначительном подъеме с увеличением возраста насаждения. Не удалось выявить статистически достоверного воздействия техногенного загрязнения на концентрацию углерода в почве.

Таблица 3.5

Содержание органического углерода в почве ($t_{ст} = 2,1 - 2,3$)

Зона загрязнения	Возраст	0 – 10 см			10 – 50 см		
		\bar{x}	δ	t_{max}	\bar{x}	δ	t_{max}
Среднего	37	1,23	0,01	1,4	0,09	0,01	1,2
	41	1,45	0,02	1,6	0,11	0,02	1,1
	70	1,59	0,01	1,7	0,12	0,04	0,8
Сильного	35	1,31	0,02	1,4	0,08	0,02	1,3
	55	1,54	0,01	1,7	0,14	0,01	1,4
	64	1,61	0,03	1,7	0,14	0,00	1,6
Деградаци	56	1,11	0,02	1,7	0,08	0,02	1,5
	61	1,28	0,01	1,1	0,07	0,01	1,6
	84	1,49	0,02	0,9	0,11	0,02	1,1
Среднее значение		1,40	0,02		0,10	0,01	

В расчеты концентрация углерода в биомассе живого напочвенного покрова, распределенной по ботаническим группам (табл. 3.6) принималась смешанная навеска, включающая корни и побеги наиболее распространенных в исследуемых насаждениях видов. Минимальное содержание углерода отмечено в ботанических группах хвощей и разнотравья (около 45%). Низкое содержание углерода в валовом химическом составе хвощей можно объяснить тем, что опорную роль в этих растениях, наряду с целлюлозой, выполняют соединения кремния. Мхи выделяются наиболее высоким содержанием углерода в своем составе, остальные ботанические группы занимают промежуточное положение.

Таблица 3.6

Концентрация углерода в фитомассе живого напочвенного покрова

Ботаническая группа	\bar{x}	δ
Мхи	52,13	$\pm 0,08$
Злаки	50,47	$\pm 0,06$
Разнотравье	45,26	$\pm 0,09$
Папоротники	47,34	$\pm 0,05$
Кустарнички	50,42	$\pm 0,06$
Хвощи	45,24	$\pm 0,05$

Изучение содержания углерода в фитомассе видов подлеска (табл. 3.7) показало, что в стволиках оно составляет 49 – 50%, при незначительной межвидовой вариации. В листьях содержится 43 – 46% углерода, низкая концентрация характерна для крушины ломкой и дуба черешчатого, максимальным содержанием углерода отличается береза бородавчатая. В корнях подлеска содержится 47 – 51% углерода.

Таблица 3.7

Концентрация углерода в фитомассе подлеска

Вид	Стволик		Листья		Корни	
	\bar{x}	δ	\bar{x}	δ	\bar{x}	δ
Рябина обыкновенная	50,3	$\pm 0,09$	45,4	$\pm 0,09$	51,3	$\pm 0,08$
Крушина ломкая	49,8	$\pm 0,08$	43,2	$\pm 0,06$	48,7	$\pm 0,07$
Береза бородавчатая	50,4	$\pm 0,12$	46,1	$\pm 0,11$	47,6	$\pm 0,25$
Лещина обыкновенная	49,0	$\pm 0,13$	44,7	$\pm 0,15$	45,3	$\pm 0,13$
Дуб черешчатый	52,4	$\pm 0,20$	43,2	$\pm 0,14$	47,4	$\pm 0,14$
Клен остролистный	53,4	$\pm 0,08$	45,1	$\pm 0,21$	49,3	$\pm 0,34$
Граб обыкновенный	50,1	$\pm 0,07$	44,3	$\pm 0,09$	48,5	$\pm 0,21$
Ясень обыкновенный	49,3	$\pm 0,09$	45,9	$\pm 0,08$	47,0	$\pm 0,12$
Бересклет бородавчатый	50,7	$\pm 0,15$	44,3	$\pm 0,15$	49,7	$\pm 0,18$

Обобщенный анализ содержания углерода в компонентах фитоценоза показывает, что наименьшее его содержание характерно для высоко физиологически активных частей (главным образом фотосинтезирующих). В них содержание углерода редко превышает 46 – 47%. Высокое содержание в их составе азота, макро и микроэлементов, необходимых для протекания биохимических и физиологических процессов, снижает долю углерода в валовом химическом составе. Компоненты, выполняющие механические функции

(опорную, защитную и пр.) имеют более высокое содержание углерода, т.к. основными веществами, входящими в их состав являются углеводы, обладающие высокой долей углерода.

3.2. Оценка биомассы и запаса углерода в древесной и подпологовой растительности с помощью аллометрических уравнений

Изучение баланса углерода в природных экосистемах требует получения достаточно формализованных данных о содержании углерода в их отдельных компонентах. Наиболее удобно эту формализацию проводить с помощью математических уравнений, увязывающих запас углерода с рядом таксационных и некоторых других внешних признаков растений.

Древостой является наиболее значимым биотическим звеном цикла углерода в лесных экосистемах. На его долю приходится значительная часть запаса углерода, и, особенно, его годичной фиксации. Древостой отличается и довольно продолжительным сроком удержания углерода. Это создает предпосылку для первоочередного поиска основных закономерностей формирования биомассы и запаса углерода именно в данном компоненте биоценоза. Как показывает опыт предыдущих исследований [216, 252, 253, 259, 265, 263, 291, 307], эти закономерности целесообразно выразить в виде уравнений, описывающих влияние на данные показатели основных лесотаксационных признаков.

Проведение статистического анализа позволило рассчитать уравнения связи запаса углерода во фракциях отдельных деревьев сосны с рядом легкоопределяемых признаков для древостоев искусственного происхождения I^a – II класса бонитета, произрастающих в условиях Полесско-Приднепровского геоботанического округа. Поиск данных уравнений является не только предварительным этапом нашей работы – полученные функции могут найти и самостоятельное применение в определении биомассы сосновых древостоев искусственного происхождения.

К признакам, входящим в разрабатываемые нами модели, предъявлялось два основных требования: они должны иметь тесную связь с запасом углерода в отдельных фракциях дерева, и быть легко определяемыми, (определение их не должно носить деструктивного характера). Целесообразно в качестве таких признаков выбрать те, которые традиционно применяются в лесной таксации: диаметр ствола на высоте 1,3 м, высота ствола, возраст дерева и средний радиальный прирост за несколько последних лет. При этом, в аллометрические уравнения допустимо включать их как по отдельности, так и в

различных сочетаниях один с другим, подбирая наиболее удачный вариант. Основными предикторами в уравнениях, согласно исследованиям ряда авторов [259, 273], являются диаметр и высота ствола. Возраст и средний радиальный прирост – вспомогательные, уточняющие переменные, первая из них имеет косвенную связь с массой всех фракций, а также в сочетании с диаметром и высотой она косвенно указывает на условия роста дерева. Вторая, согласно наблюдениям ряда исследователей связана с массой кроны.

Наиболее распространенным и приемлемым уравнением, аппроксимирующим массу фракций деревьев от линейных размеров последних является уравнение (3.2) вида:

$$m = a_1 \cdot (d^2 \cdot h)^{a_2} \quad (3.2)$$

Нередко эта аллометрическая функция используется в модифицированном виде, а именно с самостоятельными коэффициентами для d и h . И уравнение (3.3) принимает вид [308]:

$$m = a_1 \cdot d^{a_2} \cdot h^{a_3} \quad (3.3).$$

Гораздо реже используются уравнения квадратической и кубической параболы. Показана [85] возможность упрощения набора предикторов до одного диаметра, или добавление в него возраста и среднего радиального прироста.

Предварительно был проведен корреляционный и графический анализ по выявлению силы и характера связи между предикторами (морфометрическими признаками отдельного дерева) и определяемыми признаками (массой отдельных фракций дерева).

Проведенный регрессионный анализ (табл. 3.8) свидетельствует о том, что самым высоким уровнем линейной корреляции с массой всех рассматриваемых фракций обладает диаметр ствола, коэффициент корреляции признаков не опускается ниже 90%. Наименее тесная связь данного показателя с массой фракций кроны (хвоей и ветками), а с массой фракций ствола коэффициент корреляции выше.

Коэффициенты линейной регрессии между предикторами
и определяемыми признаками

Переменные	A	d	h	Z ₁₀	m _{древ.}	m _{кор.}	m _{вет.}
m _{древ.}	0,64	0,967	0,893	0,166	-	-	-
m _{кор.}	0,7	0,982	0,92	0,135	0,986	-	-
m _{вет.}	0,633	0,918	0,828	0,244	0,972	0,956	-
m _{хв.}	0,597	0,922	0,845	0,238	0,951	0,931	0,939

Связь массы всех фракций с диаметром ствола является экспоненциальной (рис. 3.1).

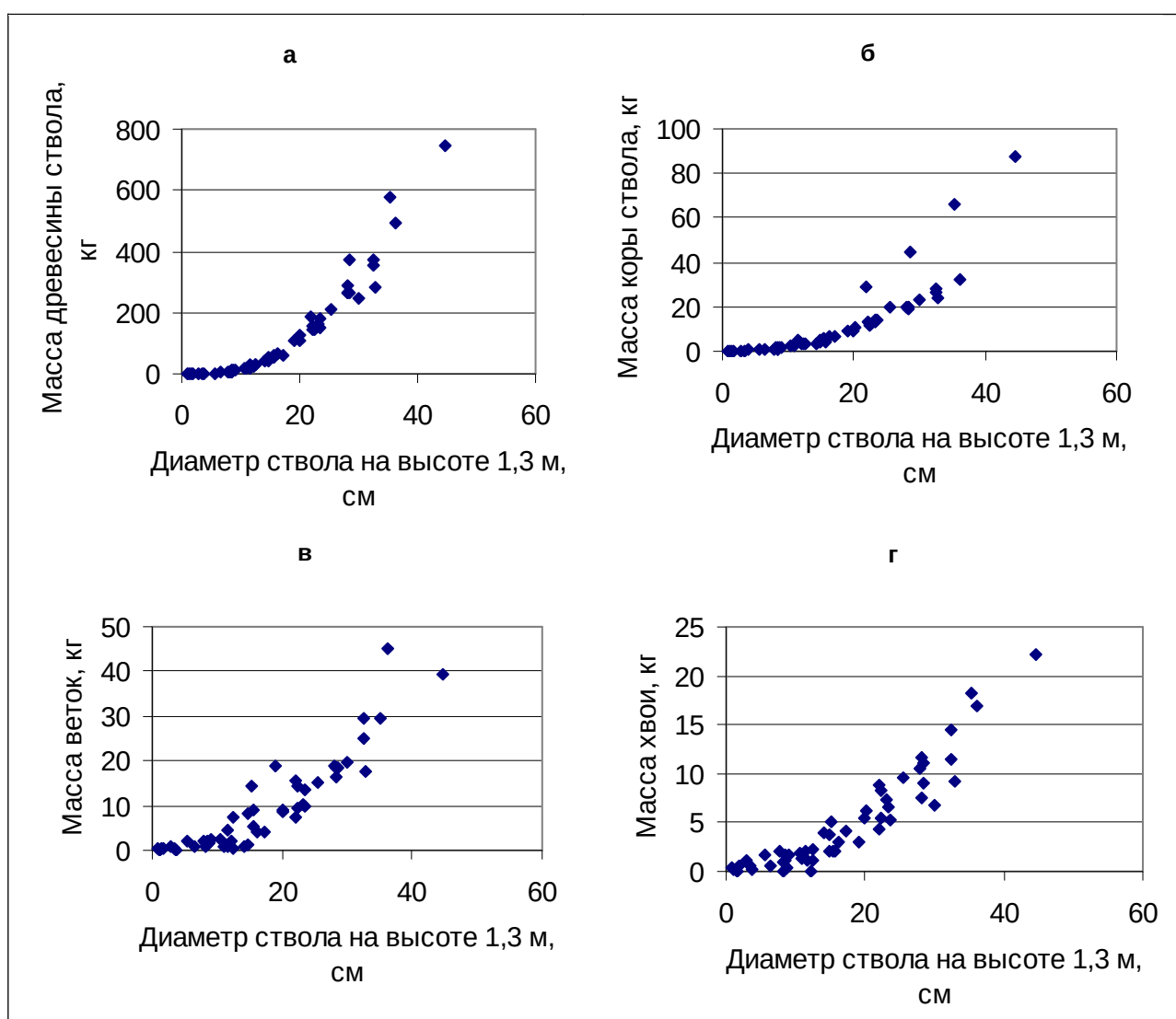


Рис. 3.1. Зависимость биомассы отдельных фракций деревьев сосны от диаметра ствола на высоте груди.

а – древесина ствола; б – кора ствола; в – ветки; г – хвоя.

Следующим по информативности показателем является высота ствола. Она имеет тесную связь с фракциями ствола, с фракциями кроны связь несколько слабее. Возраст имеет третьестепенное значение. Средний радиальный прирост за десять лет не может играть самостоятельной роли в предсказании массы фракций сосны, т.к. величина коэффициента корреляции не превышает 25%. Обращает на себя внимание тот факт, что в противоположность предыдущим предикторам, у него наиболее выражена связь с массой хвои и веток. Что, соответствует основным положениям теории пайп-модели.

При анализе тесноты связей между отдельными фракциями дерева (см. табл. 3.8) необходимо отметить, что все коэффициенты корреляции высокие, но особой теснотой связи отличаются масса древесины и коры ствола.

Исходя из предварительных результатов корреляционного анализа, в качестве исходного пункта поиска оптимальной модели, проведен расчет и статистический анализ показательного уравнения (3.4).

$$m = a_0 \cdot d^{a_1} \quad (3.4)$$

Наиболее точным оказалось показательное уравнение, описывающее массу ствола (табл. 3.9). Несколько хуже выражена зависимость для коры ствола, веток и хвои. Как видно из величины доли объясненной вариации (R^2), диаметр ствола на высоте груди хорошо описывает массу отдельных фракций, однако значительная доля вариации остается необъясненной. Не смотря на высокую однородность исследуемых объектов, одного предиктора недостаточно для расчета массы фракций. Это вызывает необходимость поиска оптимального сочетания в модели нескольких предикторов (табл. 3.10).

Таблица 3.9

Коэффициенты уравнений и оценка их точности посредством коэффициента сходимости.

Фракция	a_0	a_1	R^2
Древесина ствола	0,102336	2,354532	0,965
Кора ствола	0,00256	2,734965	0,874
Ветки	0,020210	2,05452	0,829
Хвоя	0,01832	2,026402	0,812

Таблица 3.10

Двухпредикторные модели для массы фракций сосны

Фракция	Вид функции	Параметры модели			R ²
		a ₀	a ₁	a ₂	
Древесина ствола	3.5	0,011623	1,904056	1,146317	0,991
	3.6	0,04504	2,225781	0,29922	0,967
Кора ствола	3.5	0,006868	1,642345	0,782317	0,995
	3.6	3,93E-05	2,261817	1,368135	0,908
Ветки	3.5	0,00510	3,48180	-1,05290	0,893
	3.6	0,03016	2,12769	-0,15462	0,830
Хвоя	3.5	0,08783	3,05933	-1,71369	0,856
	3.6	0,04679	2,29165	-0,54329	0,823

Двухпараметрические уравнения (3.5) и (3.6) показывают более высокую корреляцию с биомассой фракций. В целом разница составляет 1 – 12% (диаметр + высота) и 0 – 5% (диаметр + возраст) в зависимости от фракции.

$$m = a_0 \cdot d^{a_1} \cdot h^{a_2} \quad (3.5)$$

$$m = a_0 \cdot d^{a_1} \cdot A^{a_2} \quad (3.6)$$

Добавление второго параметра позволило повысить точность уравнения, предназначенного для расчета биомассы коры и древесины ствола, чего нельзя сказать в отношении биомассы фракций кроны. Необходимо отметить, что во всех случаях более желательным является добавление высоты, однако нами приведены уравнения, включающие и возраст по той причине, что определение этого показателя при многолетних наблюдениях проще. Наиболее отзывчивой на введение возраста в качестве второго параметра оказалась кора ствола. Добавление же его в уравнения, описывающие массу веток, древесины ствола и хвои, хотя и повышает точность, но не намного.

Трехпараметрическая модель, включающая диаметр на высоте груди, высоту и возраст не дает существенных преимуществ перед наиболее удачными вариантами двухпараметрической.

Точность моделей для фракций ствола и корней можно признать удовлетворительной, ее повышение возможно только за счет существенного увели-

чить сложности уравнения и процедуры расчета. Что касается биомассы кроны, то есть возможность без особых затрат улучшить точность ее оценки.

Предварительный регрессионный анализ между остатками уравнений из таблицы 3.9 и 3.10 и средним радиальным приростом за 2 – 10 последних года показал, что для определения массы хвои целесообразно брать средний радиальный прирост за последние два года, а веток – за последние 7 лет. Наиболее точными для расчета массы фракция кроны оказались уравнения (3.7) и (3.8) включающие диаметр дерева на высоте груди, высоту, и средний прирост (табл. 3.11).

$$m = a_0 \cdot d^{a_1} \cdot z^{a_2} \quad (3.7)$$

$$m = a_0 \cdot d^{a_1} \cdot h^{a_2} \cdot z^{a_3} \quad (3.8)$$

Таблица 3.11

Модели зависимости массы фракций кроны от морфометрических показателей деревьев и их среднего радиального прироста

Фракция	Вид уравнения	Срок осреднения радиального прироста	a_0	a_1	a_2	a_3	R^2
Хвоя	3.7	2	0,04278	1,563361	0,390606		0,873
	3.8	2	0,054562	2,444613	-0,97106	0,346527	0,903
Ветки	3.7	7	0,052803	1,71692	0,257062		0,844
	3.8	7	0,006138	3,172282	-0,82656	0,278467	0,918

Если добавление среднего радиального прироста за несколько лет в уравнение описывающие биомассу веток, позволило повысить процент объясненной вариации только на 1%, то в отношении биомассы хвои прирост составил более 5%. Включение в модель среднего радиального прироста сходным образом увеличивает точность как уравнения основанного на диаметре ствола на высоте груди, так и основанного на диаметре и высоте ствола.

Таким образом, добавление в уравнения среднего радиального прироста за последние два года для хвои и за последние 7 лет для веток позволяет повысить точность моделей описывающих биомассу фракций кроны.

Приведенные функции дают весьма точную оценку рассматриваемых фракций деревьев сосны и вполне пригодны для оценки массы отдельных деревьев сосны в насаждениях искусственного происхождения.

Путем синтеза описанных выше уравнений, предназначенных для определения фитомассы отдельных фракций сосны с данными по содержанию углерода в них (см. табл. 3.1) получены функции для определения массы углерода во фракциях отдельного дерева по его диаметру на высоте груди, высоте, возрасту и, в отдельных случаях, по среднему радиальному приросту за несколько последних лет (табл. 3.12).

Таблица 3.12

Коэффициенты уравнений для определения запаса углерода в отдельных фракциях сосны (кг)

Фракция	Вид функции	a_0	a_1	a_2	a_3	R^2
Древесина ство- ла	3.4	0,0514	2,3545			0,965
	3.5	0,0058	1,9040	1,1463		0,991
	3.6	0,0226	2,2257	0,2992		0,967
Кора ствола	3.4	0,0013	2,7350			0,874
	3.5	0,0035	1,6423	0,7823		0,995
	3.6	2,06E-05	2,2618	1,3681		0,908
Ветки	3.4	0,0103	2,0545			0,829
	3.5	0,0026	3,4818	-1,0529		0,893
	3.6	0,0154	2,1276	-0,1546		0,830
	3.7	0,0270	1,7169	0,2571		0,844
	3.8	0,0031	3,1723	-0,827	0,2785	0,918
Хвоя	3.4	0,0085	2,0264			0,812
	3.5	0,0407	3,0593	-1,7136		0,856
	3.6	0,0217	2,2916	-0,5432		0,823
	3.7	0,0199	1,5634	0,3906		0,873
	3.8	0,0253	2,4446	-0,9710	0,3465	0,903

Полученные уравнения можно применять для определения массы углерода во фракциях отдельных деревьев сосны и, путем суммирования, определения массы углерода в надземных фракциях дерева. В таблицах П.2.1, П.2.2. приведены расчеты запаса углерода в отдельных фракциях сосны, выполненные с помощью найденных уравнений. Масса углерода, запасенного в древесное, должна определяться, исходя из суммы его запасов во всех деревьях входящих в него. Выбор уравнения зависит от соотношения требуемого уровня точности и возможных затрат на проведение исследований.

Для определения массы углерода, содержащегося в подпологовой древесной растительности, было проведено изучение связей между морфометрическими показателями подлеска и его биомассой и массой углерода запасенного в нем. В качестве морфометрических показателей были выбраны высота (длина стволика) и диаметр на высоте 50 см от уровня почвы. Данная высота для измерения диаметра была выбрана по той причине, что в ряде насаждений лишь единичные экземпляры подлеска достигают более высоких размеров (скажем более привычного 1,3 м), а диаметр на выбранной высоте, как будет показано ниже, является вполне подходящим для решения поставленных задач. Следует отметить, что у кустарников, которые имеют несколько стволиков, в расчеты надземной биомассы принимался каждый из них в отдельности. Для расчета биомассы надземной части во всем кусте необходимо рассчитать и сложить его массу в отдельных стволиках. Масса корней находилась для всего куста в целом. Но затем распределялась по стволикам пропорционально их массе.

Предварительный анализ показал, что наиболее приемлемым, для определения массы фракций подлеска является уравнение (3.9) вида:

$$m = a_0 + a_1 \cdot d_{0,5}^{a_2}, \quad (3.9)$$

где $d_{0,5}$ – диаметр стволика на высоте 0,5 м от земли, см.

Рассчитывалась масса стволика, масса листвы и масса корней. В обработку были включены следующие наиболее распространенные виды подпологовой растительности:

- ✓ Рябина обыкновенная
- ✓ Крушина ломкая
- ✓ Береза бородавчатая
- ✓ Лещина обыкновенная
- ✓ Дуб черешчатый
- ✓ Клен остролистный
- ✓ Граб обыкновенный
- ✓ Ясень обыкновенный
- ✓ Бересклет бородавчатый.

В результате нелинейного регрессионного анализа получены следующие коэффициенты вышеприведенного уравнения (табл. 3.13).

Таблица 3.13

Коэффициенты в уравнениях связи (уравн. (3.9)) биомассы фракций подлеска и подроста (г) с диаметром на высоте 50 см

Вид	Фракция	Коэффициенты уравнения	R ²
-----	---------	------------------------	----------------

		a_0	a_1	a_3	
1	2	3	4	5	6
Рябина	Стволик	-0,9216	0,7225	2,1295	0,972
	Листья	3,8316	0,0632	2,1562	0,985
	Корни	1,2541	0,2348	2,1647	0,832
Крушина ломкая	Стволик	-3,9519	0,5913	2,2326	0,996
	Листья	2,2162	0,0760	2,2360	0,926
	Корни	0,1255	0,2004	2,2451	0,897
Береза бородавчатая	Стволик	1,1450	5,1250	1,4088	0,999
	Листья	0,9300	2,7700	1,2740	0,989
	Корни	0,6524	1,8457	1,3240	0,884
Лещина обыкновенная	Стволик	157,3638	0,0124	3,3018	0,997
	Листья	141,3247	0,0115	3,7054	0,997
	Корни	20,3214	0,3254	3,4158	0,974
Дуб черешчатый	Стволик	-1,0218	0,4989	2,3153	0,984
	Листья	-2,9393	0,1975	2,3043	0,665
	Корни	-8,4571	0,1458	2,3354	0,849
Клен остролистный	Стволик	7,6847	0,1298	2,6145	1,000
	Листья	4,1243	0,0570	2,0773	0,998
	Корни	2,3642	0,0452	2,6325	0,887
Граб обыкновенный	Стволик	-1,7708	1,9976	1,7924	0,912
	Листья	-0,0353	0,5365	1,5392	0,908
	Корни	1,0254	6,2147	1,7821	0,845

Продолжение табл. 3.13

1	2	3	4	5	6
Ясень обыкновенный	Стволик	-5,1583	0,4469	2,2739	0,999
	Листья	-1,0781	5,8641	0,9128	0,925
	Корни	-1,2542	0,1726	2,3204	0,816
Бересклет бородавчатый	Стволик	6,4845	0,1295	2,8370	0,997
	Листья	1,2699	0,0893	2,4961	0,982
	Корни	2,1547	0,0417	2,7451	0,751

Наиболее точно из трех фракций оценивается биомасса стволика (в большинстве случаев $R^2 = 0,99$), масса листьев оцениваются несколько хуже и точность уравнения во многом зависит от вида растения. У большинства видов хуже всего диаметром на высоте 50 см детерминирована биомасса корней. Наивысшей связью между биомассой всех фракций и морфометрическими характеристиками обладают такие виды, как береза и клен, а наименьшей (но при этом остающейся достаточно высокой) рябина, граб и дуб. Остальные виды занимают промежуточное положение.

На основании полученных результатов можно утверждать, что выбранная нами функция вполне подходит для описания зависимости биомассы отдельных фракций подпологовой древесной растительности от диаметра стволика.

Для пересчета биомассы на массу углерода и последующего расчета запаса углерода по диаметру стволика на высоте 50 см (табл. 3.14) использованы рассчитанные нами величины концентрации углерода во фракциях различных видов составляющих подлесок.

С помощью приведенных уравнений можно определить массу стволика, массу листвы на нем и массу корней для деревьев. Для вычисления массы куста (для кустарников) складывается масса отдельных стволиков, листьев на них и корней соответствующих всем стволикам.

Таблица 3.14

Коэффициенты в уравнениях связи массы углерода во фракциях
подлеска и подроста (г) с диаметром на высоте 50 см

Вид	Фракция	Коэффициенты уравнения			R ²
		a ₀	a ₁	a ₃	
Рябина	Стволик	-0,4636	0,3634	2,1295	0,972
	Листья	1,7396	0,0287	2,1562	0,985
	Корни	0,6434	0,1205	2,1647	0,832
Крушина ломкая	Стволик	-1,9680	0,2945	2,2326	0,996
	Листья	0,9574	0,0328	2,2360	0,926
	Корни	0,0611	0,0976	2,2451	0,897
Береза бородавчатая	Стволик	0,5771	2,5830	1,4088	0,999
	Листья	0,4287	1,2770	1,2740	0,989
	Корни	0,3105	0,8786	1,3240	0,884
Лещина обыкновенная	Стволик	77,1082	0,0061	3,3018	0,997
	Листья	70,3423	0,0055	3,3018	0,997
	Корни	9,2056	0,1474	3,4158	0,974
Дуб черешчатый	Стволик	-0,5354	0,2614	2,3153	0,984
	Листья	-1,2698	0,0853	2,3043	0,665
	Корни	-4,0087	0,0691	2,3354	0,849
Клен остролистный	Стволик	4,1036	0,0693	2,6145	1,000
	Листья	1,8600	0,0257	2,0773	0,998
	Корни	1,1656	0,0223	2,6325	0,887
Граб обыкновенный	Стволик	-0,8871	1,0008	1,7924	0,912
	Листья	-0,0156	0,2376	1,5392	0,908
	Корни	0,4973	3,0141	1,7821	0,845
Ясень обыкновенный	Стволик	-2,5430	0,2203	2,2739	0,999
	Листья	-0,4948	2,6916	0,9128	0,925
	Корни	-0,5895	0,0811	2,3204	0,816
Бересклет бородавчатый	Стволик	3,2876	0,0657	2,8370	0,997
	Листья	0,5626	0,0396	2,4961	0,982
	Корни	1,0709	0,0207	2,7451	0,751

Таким образом, нами получены достаточно надежные уравнения связи между морфометрическими признаками подпологовой древесной растительности (диаметром на высоте 50 см) и массой накопленного в ней углерода. В таблице П.2.3. представлены результаты расчета запаса углерода, приходящиеся на отдельные особи деревьев и стволы кустарников рассматриваемых видов подпологовой древесной растительности.

Выводы

1. В результате обработки экспериментальных данных выявлена следующая средняя концентрация по массе углерода во фракциях сосны:
 - ◆ в стволовой древесине – $50,19 \pm 0,02\%$;
 - ◆ в коре ствола – $52,34 \pm 0,09\%$;
 - ◆ в ветках – $51,07 \pm 0,04\%$;
 - ◆ в хвое – $46,45 \pm 0,12\%$;
 - ◆ в корнях – $51,06 \pm 0,05\%$.
2. Установлено, что концентрация углерода в лесной подстилке в подгоризонте A_0' составляет $45,0 \pm 0,1\%$, в A_0'' – $38,5 \pm 0,1\%$, в A_0''' – $32,4 \pm 0,3\%$. Концентрация углерода в древесном детрите составляет $50,1 - 63,1\%$, с увеличением срока разложения она возрастает.
3. В слое почвы 0 – 10 см под культурами сосны I^a – II бонитетов средняя концентрация углерода составляет $1,40 \pm 0,02\%$, в слое 10 – 50 см – $0,10 \pm 0,01\%$. Влияние техногенного загрязнения на концентрацию углерода в горизонтах почвы не установлено.
4. Содержание углерода в живом напочвенном покрове колеблется от 45,24% до 52,13%. В стволиках подлеска содержание углерода составляет от 49,3% до 53,4%, в листьях – от 43,2% до 46,1%, в корнях – от 47,0% до 51,3%, с незначительной вариацией от вида к виду.
5. Результаты статистических анализов свидетельствуют о том, что для определения биомассы растений и массы накопленного углерода в древесине и коре ствола сосны обыкновенной наиболее целесообразно использовать связь этих показателей с диаметром на высоте груди и высотой.
6. Наши исследования показали, что в уравнениях, предназначенных для определения биомассы фракций подлеска и запасов накопленного в них углерода, целесообразно использование диаметра стволика на высоте 0,5 м.

ГЛАВА 4

ВОЗРАСТНАЯ ДИНАМИКА НАКОПЛЕНИЯ УГЛЕРОДА В СОСНОВЫХ ФИТОЦЕНОЗАХ

4.1. Формирование запасов углерода в почве, лесной подстилке, подлеске и живом напочвенном покрове

Углерод, запасенный в органическом веществе минеральной части почвы, является наиболее стабильным пулом – его запасы относительно мало изменяются в процессе развития сосновых культур (Табл. П.3.1). Регрессионный анализ позволил нам выявить слабую возрастную динамику накопления углерода в почве. Кроме возраста, на этот пул углерода оказывает влияние и бонитет, который косвенно связан с агрохимической характеристикой почв суходольных сосняков. О положительном влиянии повышения трофности и улучшения режима увлажнения на запасы органического углерода в почве в условиях Полесья упоминается в работе П.С. Пастернака и др. [165], изучавших особенности запасов органического вещества почв в различных типах лесорастительных условий. Обнаруженные закономерности нашли свое математическое отображение в рассчитанных, посредством метода наименьших квадратов, уравнениях (4.1) и (4.2). Бонитет, здесь и далее в работе, выражен в виде средней высоты насаждения в 100 лет – такой подход более удобен, чем традиционный способ обозначения класса бонитета, и поэтому нашел широкое применение при моделировании различных процессов в лесных сообществах [231, 273].

$$M_{0-10} = - 0,710479 + 0,064095 \cdot A + 0,145112 \cdot B \quad (4.1)$$

$$M_{10-50} = - 0,069877 + 0,006886 \cdot A + 0,130707 \cdot B \quad (4.2)$$

где M_{0-10} – Запас углерода в слое почвы 0 – 10 см

M_{10-50} – Запас углерода в слое почвы 10 – 50 см

В соответствии с выявленными закономерностями формирования запасов углерода в почве (табл. 4.1) можно заключить, что более интенсивно происходит накопление углерода в верхнем (0 – 10 см) слое почвы, при увеличении возраста насаждения с 20 до 90 лет он возрастает приблизительно в 2 раза. Средняя скорость накопления органического углерода в нем составляет $68,5 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$. Причем эта величина близка для насаждений, относящихся ко всем рассматриваемым классам бонитета.

Таблица 4.1

Запасы углерода в минеральной части почвы сосняков искусственного происхождения

Возраст, лет	Запас углерода в слое почвы, т·га ⁻¹								
	0 – 10 см	10 – 50 см	Сумма	0 – 10 см	10 – 50 см	Сумма	0 – 10 см	10 – 50 см	Сумма
	Бонитет I ^a			Бонитет I			Бонитет II		
20	5,36	4,38	9,74	4,78	3,86	8,64	4,20	3,34	7,53
30	6,00	4,45	10,45	5,42	3,93	9,35	4,84	3,40	8,24
40	6,64	4,52	11,16	6,06	4,00	10,06	5,48	3,47	8,95
50	7,28	4,59	11,87	6,70	4,06	10,77	6,12	3,54	9,66
60	7,92	4,66	12,58	7,34	4,13	11,48	6,76	3,61	10,37
70	8,56	4,73	13,29	7,98	4,20	12,19	7,40	3,68	11,08
80	9,21	4,79	14,00	8,63	4,27	12,90	8,04	3,75	11,79
90	9,85	4,86	14,71	9,27	4,34	13,61	8,69	3,82	12,50

В более глубоких слоях процесс накопления заторможен. Благодаря такому соотношению запас органического углерода в слое 0 – 10 см. в молодняках незначительно отличается от слоя 10 – 50 см, но к возрасту спелости разница составляет около $5 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Общий запас органического углерода в почве за период с 20 до 90 лет увеличивается приблизительно в 1,5 раза (с $7,53 - 9,74$ до $12,50 - 14,71 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$). При переходе от I^a бонитета к I и от I ко II запас углерода в органическом веществе минеральной части почвы убывает на 10 – 11%. С развитием насаждений эта разница несколько уменьшается.

Лесная подстилка является значимым участником цикла углерода в лесных биогеоценозах. Поступивший в нее (в виде опада) углерод частично окисляется и поступает в форме углекислого газа в атмосферу, частично преобразуется химически и превращается в сложные органические соединения почвы. Но эти процессы в лесных насаждениях протекают с невысокой скоростью, поэтому органический углерод в составе лесной подстилки может оставаться десятилетиями. Соотношение между двумя процессами – скоростью поступления углерода с опадом, и интенсивностью его эмиссии в атмосферу в виде CO_2 и в более глубокие горизонты почвы в виде гуминовых веществ – определяет наличный запас углерода в подстилке. Факторы, влияющие на два этих процесса, косвенным образом оказывают воздействие и на запасы лесной подстилки [131, 310].

Запасы углерода в лесной подстилке на постоянных и временных пробных площадях (Таблица П.3.2) колеблются в пределах $0,86 - 36,59 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Различия между значениями весьма существенны, поэтому была поставлена задача по выявлению факторов, оказывающих доминирующее влияние на запасы подстилки. В качестве таких факторов наиболее вероятно выступают таксационные показатели насаждения, которые, во первых, определяют массу поступающего опада, а во вторых, создают специфические условия разложения подстилки. Для анализа нами отобрано пять показателей: возраст насаждения, бонитет, полнота, запас и сумма площадей поперечного сечения.

Наибольшее влияние на запасы подстилки оказывают такие факторы, как бонитет насаждения, сумма площадей поперечного сечения и запас стволовой древесины (табл. 4.2). С повышением класса бонитета, запаса и суммы площадей поперечного сечения запас углерода в подстилке возрастает. Незначительная линейная связь наблюдается между ним и возрастом насаждения.

Таблица 4.2

Коэффициенты линейной корреляции между запасом углерода в лесной подстилке и таксационными показателями
(достоверные на 95% уровне значимости значения подчеркнуты)

Факторы	A	B	P	W	G
Коэффициенты корреляции	0,27	<u>-0,52</u>	-0,06	<u>0,6</u>	<u>0,42</u>

Далее нами был произведен поиск функции, выражающей зависимость запаса углерода в лесной подстилке от таксационных показателей. Функция вычислялась методом наименьших квадратов, а для поиска факторов, которые необходимо включить в нее применялся метод наилучшего подмножества.

В качестве предикторов в это уравнение (4.3) вошли бонитет насаждения (высота в базовом возрасте, м) и возраст (лет). Хотя возраст и не отличался высоким коэффициентом линейной корреляции с предсказываемым признаком, однако включение его в модель оказалось статистически целесообразным.

$$M_{\text{подст}} = -20,4785 - 0,0254 \cdot B^2 - 0,0698 \cdot A \cdot \ln(A) + 0,6379 \cdot \ln(A) \cdot B, \quad (4.3)$$

где $M_{\text{подст}}$ – масса подстилки, т·га⁻¹;

Наши исследования показали (рис. 4.1), что на начальных этапах роста запасы подстилки в сосновых насаждениях различных бонитетов близки друг к другу и в 20 лет составляют приблизительно 7 - 11 т·га⁻¹. С увеличением возраста отличия между сосняками, произрастающими в различных условиях, усиливаются, и к 80 годам насаждения II бонитета накапливают на 10 т·га⁻¹ углерода в подстилке меньше по сравнению с насаждениями I^a бонитета, при запасе в последних 18 т·га⁻¹.

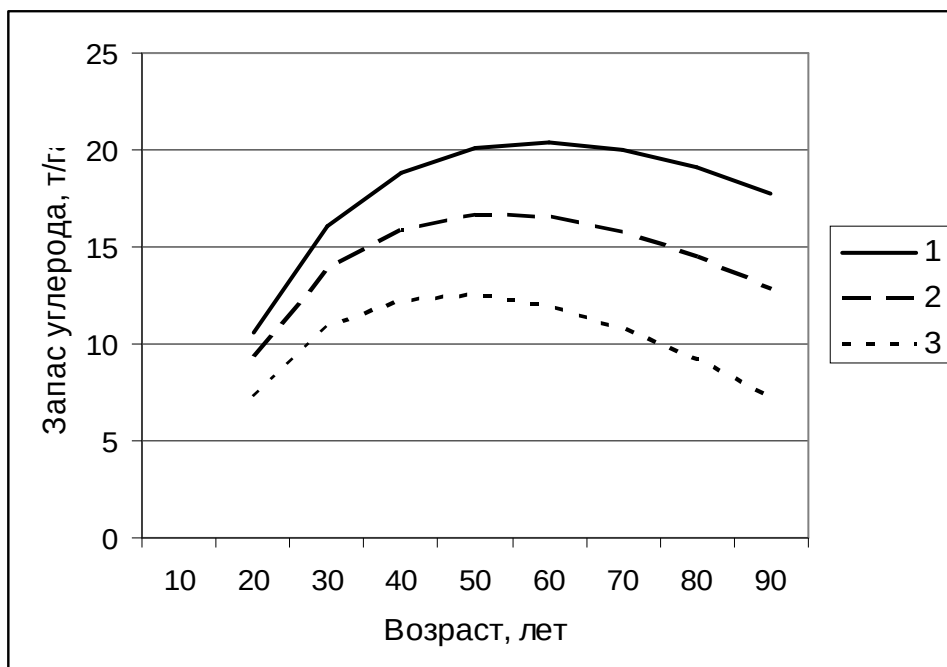


Рис. 4.1. Динамика изменения запасов углерода в лесной подстилке.
1 - бонитет I^а; 2 – бонитет I; 3 – бонитет II.

Обращает на себя внимание наличие максимума запаса лесной подстилки, приходящегося на 40 – 60 лет. В насаждениях, произрастающих в более благоприятных условиях, этот максимум наступает несколько позже и имеет более высокую величину (в насаждениях I^а бонитета – 20 т·га⁻¹, а II бонитета - 13 т·га⁻¹). В результате насаждения II бонитета, к возрасту 85 лет имеют немногим больший запас по сравнению с 20 годами, тогда, как за тот же промежуток времени насаждения I^а бонитета в итоге накапливают 7 т·га⁻¹ углерода. Возрастная динамика запасов углерода в насаждениях I бонитета имеет промежуточный характер между двумя вышеописанными. Такое явление можно объяснить тем, что запас лесной подстилки определяется, прежде всего, величиной опада, которая, в свою очередь, зависит от запаса биомассы кроны [309]. Запас же фракций кроны имеет максимум в возрасте 30 – 40 лет. Возрастное отставание максимума запаса углерода в лесной подстилке от максимума запаса биомассы кроны объясняется инерционностью процессов разложения подстилки. Сходное поведение запасов лесной подстилки описано Е.В. Рябухой [310].

Живой напочвенный покров принимает активное участие в функционировании лесного фитоценоза. Хотя запасы его биомассы невелики по сравнению с биомассой древесного яруса, однако процессы поглощения и высвобождения им химических элементов, в том числе и углерода, происходят с высокой интенсивностью. Запасы биомассы и накопленного углерода по ботаническим группам, в изученных нами насаждениях приведены в табл. П.3.3. Запас углерода в живом напочвенном покрове находится в пределах $0,03 - 3,26 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, со средним значением $0,85 \pm 0,25 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Данная величина зависит от условий произрастания, а также от таксационных показателей насаждения [311 – 317]. Что бы выявить наиболее значимые факторы формирования запаса углерода в живом напочвенном покрове был проведен корреляционный анализ (табл. 4.3).

Таблица 4.3

Коэффициенты линейной корреляции между запасом углерода в живом напочвенном покрове и некоторыми признаками насаждения

Признаки насаждения	А	В	Р	W	G
Коэффициент линейной корреляции	0,11	-0,03	0,13	0,22	0,24

Исследования показали, что запас углерода в живом напочвенном покрове не имеет сильной линейной связи ни с одним из приведенных признаков. Достоверным не оказался ни один из коэффициентов. Наиболее сильная положительная связь выявлена с суммой площадей поперечного сечения и запасом стволовой древесины.

В ходе проведения регрессионного анализа (подбор коэффициентов осуществлялся по методу наилучшего подмножества) не выявлено уравнение, достоверно описывающее зависимость запасов углерода в живом напочвенном покрове от таксационных показателей насаждения. Поэтому статистически обосновано, при рассмотрении возрастной динамики запасов углерода в сосновых культурценозах, считать запас углерода в живом напочвенном покрове неизменным и равным $0,85 \pm 0,25 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$.

Одним из пулов углерода в лесном фитоценозе является подпологовая древесная растительность, его суммарные запасы на исследованных пробных площадях (табл. П.2.4) подвержены значительной вариации и на разных пробных площадях могут отличаться почти на порядок. Причину такой вариации наиболее вероятно обнаружить в признаках насаждения (бонитете, возрасте, полноте, запасе стволовой древесины и сумме площадей поперечного сечения). Корреляционный анализ показывает (табл. 4.4),

что наиболее тесная линейная связь у запаса углерода в подпологовой древесной растительностью с возрастом насаждения. Сильной положительной связью отличается и запас стволовой древесины. Полнота оказывает сильное отрицательное воздействие на рассматриваемый признак.

Таблица 4.4

Коэффициенты линейной корреляции между запасом углерода в подпологовой древесной растительности и таксационными показателями (достоверные на 95% уровне значимости значения подчеркнуты)

Признак насаждения	A	B	P	W	G
Коэффициент линейной корреляции	<u>0,95</u>	-0,09	<u>-0,72</u>	<u>0,70</u>	0,20

В результате регрессионного анализа подобрано (методом наилучшего подмножества) уравнение, отражающее зависимость запаса углерода в подпологовой древесной растительности от признаков насаждения. Бонитет и возраст насаждения включены в регрессионное уравнение (формула (4.4)), как факторы, которые совместно объясняют наибольший процент вариации.

$$M_{\text{подпол.}} = 1,0335985 - 0,166037 \cdot A + 0,002241 \cdot A^2 + 0,002559 \cdot B \cdot A, \quad (4.4)$$

где $M_{\text{подпол.}}$ – масса подпологовой древесной растительности, $\text{т} \cdot \text{га}^{-1}$.

В соответствии с полученной моделью, запас углерода в подлеске и подросте в первые годы развития соснового древостоя близок к нулю (рис. 4.2). С возрастом в сосняках всех классов бонитета он увеличивается. Особенно интенсивное накопление углерода в подпологовой древесной растительности начинается после 40 лет и в дальнейшем, вплоть до 90 лет он экспоненциально увеличивается. В насаждениях высших бонитетов (I^a , I) увеличение запаса углерода происходит интенсивнее, и к 80 годам запас углерода достигает величины в $8 - 9 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Тогда, как в том же возрасте, но в насаждениях II бонитета запас углерода в подпологовой древесной растительности немногим больше $7 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ [315].

Средняя скорость накопления углерода в подпологовой древесной растительности составляет $0,141$, $0,132$ и $0,115 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ в насаждениях I^a , I и II бонитетов, соответственно.

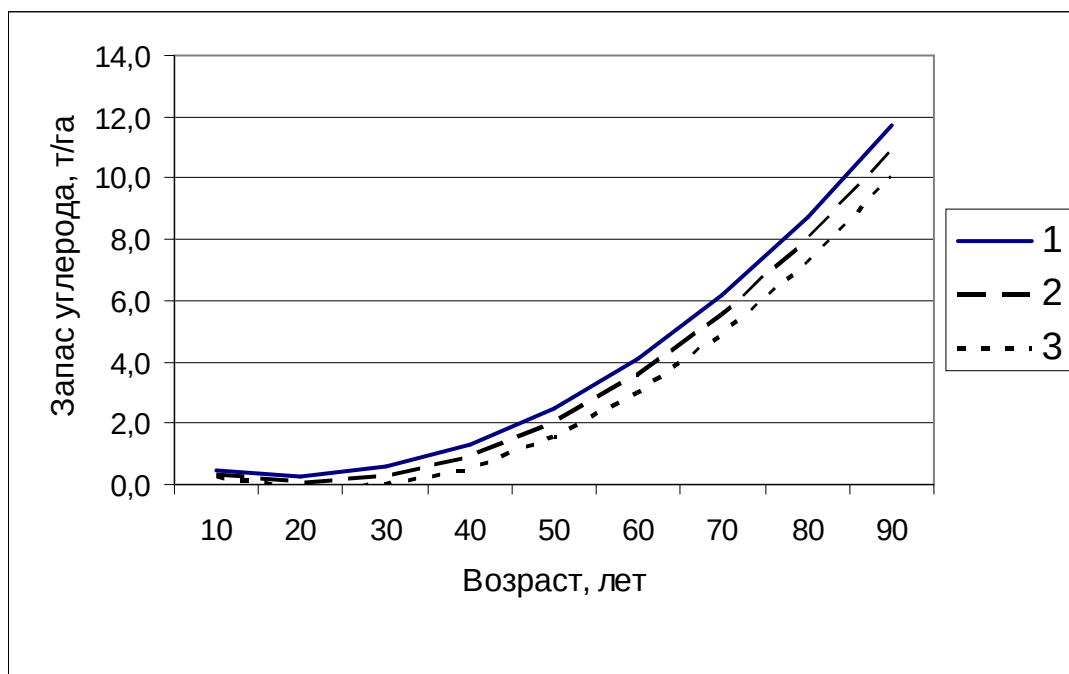


Рис. 4.2. Возрастная динамика запасов углерода в древесной подпологовой растительности.

Условные обозначения см. рис. 4.1.

4.2. Накопление углерода в древесном ярусе

Степень вовлеченности лесной экосистемы в углеродный цикл зависят от ряда ее внутренних, прежде всего от его состава, возраста, типа леса, ассоциации, бонитета, полноты и ряда других. Определяются они так же и теми лесохозяйственными мероприятиями, которые проводились на данном участке леса, и степени антропогенной, главным образом техногенной, нагрузки. Поэтому является актуальным определение запаса углерода в фитомассе древостоя, и интенсивности его накопления в ней, в зависимости от таксационных показателей насаждения, и антропогенного воздействия. Полученные зависимости должны лечь в основу региональной составляющей модели глобального цикла углерода.

Важной характеристикой углеродного цикла является величина ежегодного поступления углерода с вырубкой и отпадом стволов. Она показывает величину оттока углерода из пула фитомассы деревьев, и поступление его по ходу цикла в остальные пулы. Эта величина во многом определяет количественный и качественный состав фракций углерода в остальных компонентах углеродного цикла лесного сектора.

Возрастная динамика показателей, отражающих углероддепонирующую функцию древостоя сосняков искусственного происхождения, приведена в Табл. П.3.5. В анализ включены насаждения I бонитета.

Описание накопления углерода в стволовой древесине удобно проводить с использованием функций роста. Функции роста это наиболее вероятные линии изменения важнейших таксационных показателей древостоев в зависимости от их возраста. В качестве функций роста целесообразно выбирать функции, соответствующие общим закономерностям развития лесных насаждений. Преимуществом таких функций по сравнению с любыми другими аппроксимирующими функциями является то обстоятельство, что они содержат в себе предварительную информацию о закономерностях изменения биологических признаков. В результате этого выборочные оценки параметров функций достигают большей эффективности и стабильности [318]. К настоящему моменту накопилось достаточно большое количество вариантов данных функций, отличающихся по точности описания ростовых процессов, физиологической обоснованности и математической сложности.

В результате предварительного испытания функций, нами отобрана та, которая наиболее достоверно описывает процесс накопления углерода фракциями сосновых насаждений [319]. Ею оказалась функция Хосфелда (4.5):

$$M = \frac{A^2}{a_0 + a_1 \cdot A + a_2 \cdot A^2} \quad (4.5).$$

С помощью этой функции выравнивались данные по возрастной динамике углерода в стволовой древесине, коре ствола, корнях, коре и хвое (табл. 4.5). Для описания поступления углерода с отпадом и вырубкой стволовой древесины наиболее целесообразным, с позиций теории статистики, оказалось использование простой линейной функции (4.6).

$$M = a_0 + a_1 \cdot A \quad (4.6)$$

Затем вычислялись такие характеристики участия стволовой древесины в круговороте углерода, как:

- Текущая интенсивность полного поглощения углерода древостоем, т.е. накопление углерода за год в наличном древостое и в отпаде;

- Текущая интенсивность накопления углерода в наличном древостое, т.е. разность между наличным запасом углерода в текущем и в предыдущем году;
- Средняя интенсивность накопления углерода в наличном древостое;
- Средняя интенсивность полного поглощения углерода древостоем.

Таблица 4.5

Коэффициенты уравнений возрастной динамики углерода в древостое

Фракция	Вид функции	Коэффициенты		
		a_0	a_1	a_2
Древесина ствола, $\text{т} \cdot \text{га}^{-1}$	4.5	50,71087	-1,4203	2,04e-2
Кора ствола, $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$	4.5	0,228025	-0,0069	0,21e-3
Корни, $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$	4.5	0,207666	-0,0066	0,89e-4
Ветки, $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$	4.5	0,175236	-0,0013	0,68e-4
Хвоя, $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$	4.5	0,265901	-0,0142	0,53e-3
Отпад древесины ствола, $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$	4.6	787,915	6,185	
Отпад коры ствола, $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$	4.6	55,378	0,316	
Отпад корней, $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$	4.6	9,470	3,995	
Отпад ветвей, $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$	4.6	22,810	-0,187	

Возрастная динамика показателей углеродного цикла (табл. 4.6), показывает, что запас углерода в фитомассе древостоя увеличивается за первые 50 лет до $124 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, а к 80 годам лишь до $143 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Фактически, после 60 лет накопление углерода в древостое прекращается, и он остается на уровне около $140 - 145 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Пик интенсивности поглощения углерода древостоем приходится на 40 лет.

Интенсивность поступления углерода в отпад и в состав вырубаемой древесины постепенно нарастает с возрастом с $12 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ в 20 лет, до $17 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ в 80. Масса углерода в отпаде и в вырубаемой части в начальный период развития практически равна нулю. Однако она быстро возрастает и к 40 годам уже составляет $38,64 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, или почти 30% от полного запаса углерода. Дальнейшее увеличение рассматриваемого показателя приводит к тому, что в 80 лет доля углерода в отпаде и вырубаемой древесине составляет уже 47,3 % общего поглощенного углерода, или в абсолютном выражении $101,82 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$.

Таблица 4.6

Показатели участия стволовой древесины в углеродном цикле

Возраст, лет	Запас в древостое, $\text{т} \cdot \text{га}^{-1}$	Текущая интенсивность накопления углерода в на-личном дре-востое, $\text{т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$	Текущая ин-тенсивность полного поглощения углерода дре-востоем, $\text{т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$	Масса угле-рода в вы-рубаемой и по-ступающей в отпад древе-сине, $\text{т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$	Накопление уг-лерода в выруб-ленной и по-ступившей в отпад древеси-не, $\text{т} \cdot \text{га}^{-1}$	Общее поглощение углерода древостоем, $\text{т} \cdot \text{га}^{-1}$	Средняя ин-тенсивность накопления углерода в на-личном дре-востое, $\text{т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$	Средняя ин-тенсивность полного поглощения углерода дре-востоем, $\text{т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$
10	4,97	-	-	1,16	-	4,97	0,50	0,50
20	23,37	1,84	3,09	1,25	12,05	35,41	1,17	1,77
30	55,78	3,24	4,57	1,33	24,93	80,71	1,86	2,69
40	94,41	3,86	5,28	1,41	38,64	133,05	2,36	3,33
50	124,39	3,00	4,49	1,50	53,19	177,57	2,49	3,55
60	139,18	1,48	3,06	1,58	68,57	207,75	2,32	3,46
70	142,94	0,38	2,04	1,66	84,78	227,72	2,04	3,25
80	143,37	0,04	1,79	1,75	101,82	245,19	1,79	3,06

Исходя из средней интенсивности накопления углерода в наличном древостое и общего поглощения углерода, можно заключить, что наиболее интенсивное накопление углерода в древостое, как в наличном, так и в общем, происходит в возрасте до 50 лет. Согласно В.Ф. Лебкову и М.Ф. Каплиной [321] этот возраст будет являться возрастом стокоуглеродной спелости сосновых насаждений, в условиях региона исследований. После преодоления этого возраста темпы накопления углерода заметно снижаются. Причем средняя интенсивность накопления углерода в наличном древостое снижается более резко, чем средняя интенсивность полного поглощения углерода. Это говорит о том, что и после 50 лет сосновые фитоценозы поглощают значительные количества углекислого газа из атмосферы, но большая его часть теряется в результате отпада и поступления древесины в рубку.

Как видно из графика (рис. 4.3), запас углерода в стволовой древесине изменяется с возрастом неравномерно. В общих чертах динамика накопления углерода в стволовой древесине повторяет таковую для суммарного запаса. Наибольшей интенсивностью изменений он характеризуется в возрасте, приблизительно, до 50 лет [320]. Затем происходит замедление данного процесса и постепенное приближение запаса углерода к асимптоте параллельной оси возраста. К 80 годам в стволовой древесине накапливается немногим менее 100 т углерода на гектар. С возрастом доля стволовой древесины в общем запасе увеличивается с 56% в 20 лет до 67% в 80.

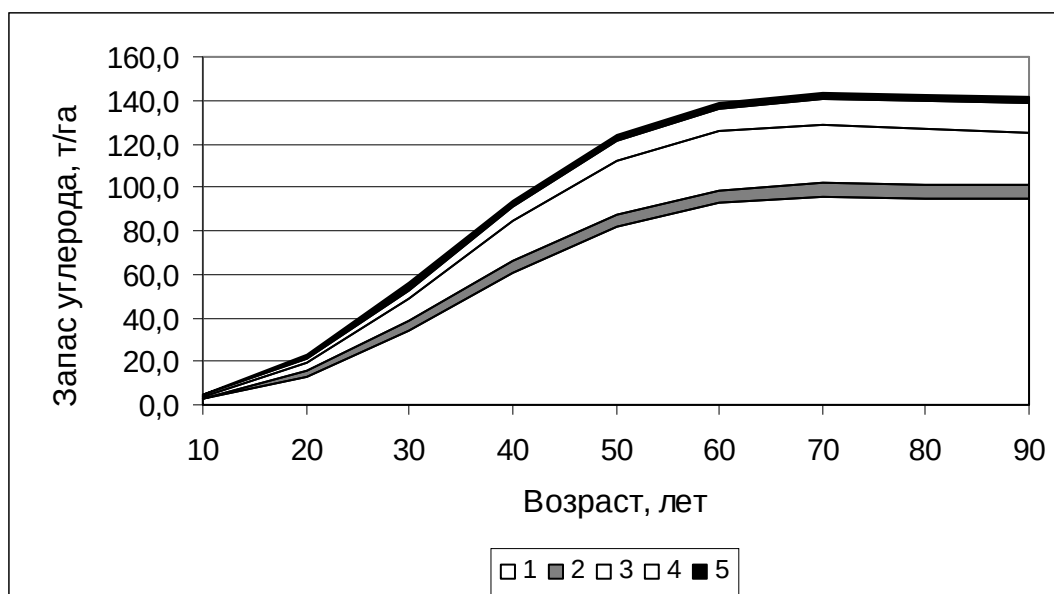


Рис. 4.3. Возрастная динамика накопления углерода во фракциях соснового древостоя.

1 — древесина ствола; 2 — кора ствола; 3 — корни; 4 — ветки; 5 — хвоя.

Следующей по величине фракцией являются корни, к 80 годам запас углерода приходящийся на них достигает $26 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ (или 18% от запаса в древе-

стое). Доля углерода коры составляет в 80 лет 4,3% от суммарного запаса, а веток и хвои соответственно 8,9% и 1,8%. Максимальный запас углерода в хвое наблюдаются в 30 – 40 лет ($2,9 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$). Запас углерода во фракциях ствола, корнях и ветвях с возрастом увеличивается.

4.3. Суммарное поглощение углерода сосновыми биогеоценозами

Анализ динамики суммарного накопления углерода в сосновом биогеоценозе (рис. 4.4) показывает, что высокая интенсивность этого процесса наблюдается в возрасте до 50 лет (максимум в 30 – 40 лет). Затем процессы накопления замедляются и постепенно выходят на плато [322, 323]. К 80 годам запас углерода достигает величины приблизительно $180 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, что в 4,25 раза больше, чем в 20 лет.

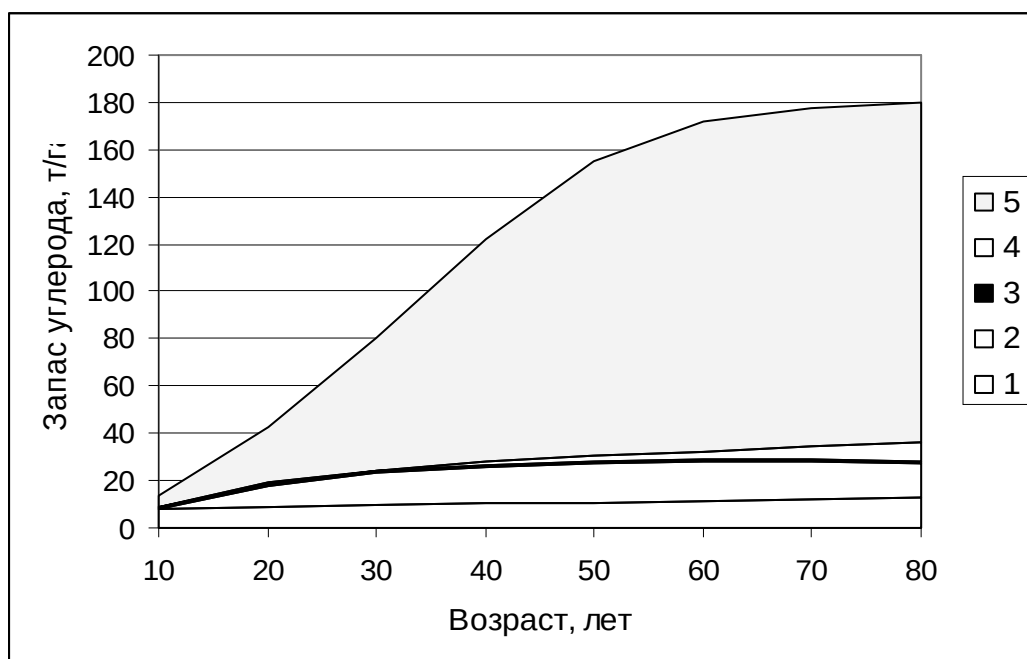


Рис. 4.4. Возрастная динамика накопления углерода в сосновом биогеоценозе искусственного происхождения.

1 – органический углерод минеральной части почвы; 2 – углерод в лесной подстилке; 3 – углерод в живом напочвенном покрове; 4 – углерод в древесной подпологовой растительности; 5 – углерод в древостое

В процессе накопления углерода изменяется и структура распределения его запаса по компонентам фитоценоза. Наиболее динамичным оказывается запас углерода в древостое, изменения в остальных компонентах по сравнению с ним мало заметны. Это объясняет то, что в 20 лет доля древостоя в

общем запасе углерода составляет 55%, а к 80 годам достигает 80%. В те же возрастные этапы на древесную подпологовую растительность приходится соответственно 0,2% и 0,4%, на лесную подстилку – 21% и 8%, на минеральные горизонты почвы – 20% и 7%. Доля живого напочвенного покрова за весь рассматриваемый период не превышает 2%. Очевидно, что запасы углерода в насаждении находятся в тесной связи с его биомассой.

Таким образом, основным объектом поглощения атмосферной углекислоты выступает древостой, в котором, в свою очередь, стволовая древесина занимает превалирующее положение.

Выводы

1. В результате исследования содержания углерода в почвах под сосновыми культурами I^a – II бонитетов установлено, что в минеральных горизонтах его запас составляет 7,5 – 14,7 т·га⁻¹, увеличиваясь с возрастом насаждения и повышением класса бонитета; в лесной подстилке его величина составляет от 7 до 20 т·га⁻¹. Максимум запаса приходится на третий класс возраста, различия в запасе между смежными классами бонитетов составляют 3 – 10 т·га⁻¹.
2. В древесной подпологовой растительности запасы углерода экспоненциально увеличиваются с возрастом, от 0,5 т·га⁻¹ в 10 лет, до 7 – 9 т·га⁻¹ в 80. Темпы накопления углерода и его общий запас возрастают с увеличением класса бонитета.
3. Установлено, что интенсивное накопление углерода в древостое происходит до 50 лет и составляет в среднем 2,5 т·га⁻¹·год⁻¹. В последующем запас углерода практически не увеличивается и остается на уровне 140 – 143 т·га⁻¹ до возраста спелости. Основная доля запаса приходится на стволовую древесину (56% – 67%), на корни и на крону 18 и 13%, соответственно.
4. Сосновый фитоценоз к 80 годам накапливает до 180 т·га⁻¹ углерода. К этому возрасту в древостое сосредотачивается 80% общего запаса углерода, а в лесной подстилке и минеральных горизонтах почвы соответственно 8 и 7%, в подпологовой древесной растительности 0,4%.

ГЛАВА 5

ВЫДЕЛЕНИЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА ДРЕВЕСНЫМ ДЕТРИТОМ И ПОЧВОЙ В СОСНОВЫХ КУЛЬТУРФИТОЦЕНОЗАХ

5.1. Выделение углекислого газа в процессе разложения древесного детрита

При изучении углероддепонирующей функции экосистем крайне необходим учет всех составляющих углеродного баланса. Активным участником биологического круговорота углерода в лесу выступает древесная мортмасса, информация об участии которой в углеродном цикле лесных биогеоценозов весьма ограничена [24, 324, 325]. Поэтому целью данного подраздела исследований явилось изучение сухостоя и валежа с точки зрения биологического круговорота углерода, а так же факторов, влияющих на выделение ими CO_2 .

Поступив в отпад, валежник и сухостой, постепенно разлагаясь, выделяют в атмосферу углекислый газ. Древесный детрит является своеобразным буфером, между отмиранием деревьев и выделением углекислого газа в атмосферу. Разлагаясь на протяжении значительного временного промежутка, древесный отпад создает дополнительный углеродный пул и, тем самым, принимает участие в формировании баланса углерода лесного биогеоценоза.

Интенсивность выделения CO_2 сухостоем и валежником сильно варьирует в зависимости от ряда факторов (табл. 5.1). Нами обнаружена тенденция к падению интенсивности выделения CO_2 в связи со сроком разложения детрита, однако эта зависимость оказалась статистически недостоверной. Это можно объяснить тем, что после отмирания испытываемые объекты находились в сильно различающихся условиях. Некоторые стволы остались стоять на корню и стояли более или менее продолжительное время, другие упали сразу; после падения на землю они могли так же попасть в разные микроклиматические условия.

Согласно результатам предварительного анализа, удовлетворительной характеристикой, отражающей состояние отпада и интенсивность его разложения, является условная плотность (отношение массы в абсолютно сухом состоянии, к объему при естественной влажности). Зависимость интенсивности выделения CO_2 от нее при естественной влажности и температуре 16 – 18 °C выражается следующим образом (5.1):

$$U_{\text{уд}} = 0,0642 - 0,1016 \cdot \rho \quad , \quad (5.1)$$

где ρ - условная плотность отпада, $\text{г} \cdot \text{см}^{-3}$.

Интенсивность выделения CO_2 сухостоем и валежником при
естественной влажности и температуре 16 – 18 °С

Условная плотность, $\text{г} \cdot \text{см}^{-3}$	Содержание воды, %	Срок разложения, лет	Условия разложения	Скорость выделения CO_2 , $\text{мг} \text{CO}_2 \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}$
0,465	30,8	2	сухостой	0,016 – 0,031
0,388	35,2	3	сухостой	0,019 – 0,045
0,464	30,7	3	сухостой	0,018 – 0,033
0,384	38,2	3	сухостой	0,021 – 0,034
0,364	35,1	3	сухостой	0,019 – 0,035
0,466	30,9	4	сухостой	0,014 – 0,030
0,481	27,4	4	сухостой	0,019 – 0,029
0,378	37,8	4	сухостой	0,017 – 0,040
0,464	30,0	5	сухостой	0,015 – 0,027
0,421	31,9	5	валежник	0,017 – 0,030
0,471	32,4	5	сухостой	0,017 – 0,024
0,451	34,1	5	сухостой	0,017 – 0,030
0,421	31,2	5	сухостой	0,014 – 0,035
0,401	42,9	5	валежник	0,010 – 0,022
0,461	31,7	5	сухостой	0,019 – 0,027
0,406	42,4	6	валежник	0,012 – 0,019
0,412	40,3	7	валежник	0,013 – 0,017
0,415	20,9	8	сухостой	0,011 – 0,013
0,419	21,9	8	валежник	0,010 – 0,012
0,327	49,5	10	валежник	0,018 – 0,050
0,434	27,8	10	валежник	0,008 – 0,009
0,323	49,1	11	валежник	0,019 – 0,056
0,432	26,8	11	валежник	0,006 – 0,008
0,434	26,9	12	валежник	0,016 – 0,018

Из уравнения (5.1) следует, что с уменьшением плотности отпада происходит усиление интенсивности выделения углекислого газа. Естественная

влажность (средняя влажность ствола в природных условиях) сильно связана с условной плотностью ($r^2 = -0,806$). Этим можно объяснить то, что интенсивность выделения CO_2 древесным детритом так же хорошо описывается уравнением, содержащим в качестве предиктора содержание влаги в объекте (средняя влажность стволов валежа составляет $35,9 \pm 6,3\%$, а сухостоя – $31,8 \pm 2,3\%$). Ее влияние на интенсивность выделения углекислого газа древесным детритом описывается следующим уравнением (5.2):

$$U_{\text{уд}} = 0,0091 + 0,0004 \cdot w, \quad (5.2)$$

где w – влажность объекта, %.

Сильное влияние на интенсивность разложения детрита оказывает температура. Нами выяснено [326], как гидротермические условия влияют на интенсивность выделения CO_2 разлагающимися сухостоем и валежником (табл. 5.2). Математически такая зависимость для сухостоя выразилась уравнением (5.3):

$$U_{\text{уд}} = -0,023797 - 0,000057 \cdot t^2 + 0,000147 \cdot t \cdot w, \quad (5.3)$$

где t – температура объекта, °C.

Таблица 5.2

Влияние температуры и влажности образца на интенсивность выделения CO_2 сухостоем и валежником, $\text{мг CO}_2 \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}$

Вариант		Валеж			Сухостой		
Влажность, %		20 - 27	28 - 32	33 - 41	20 - 25	26 - 31	32 - 37
Температура, °C	5 - 14	0,001	0,001 – 0,007	0,009 – 0,022	0,001	0,001 – 0,005	—
	15 - 24	0,003 – 0,008	0,016 – 0,029	0,015 – 0,059	0,001 – 0,005	0,007 – 0,017	0,012 – 0,034
	25 - 34	0,015	0,039 – 0,048	0,075 – 0,098	0,07	0,020 – 0,033	0,073

Интенсивность выделения углекислого газа возрастает, как при увеличении температуры (диапазон 5 - 30°C), так и при увеличении влажности объекта. Причем эти факторы сильно взаимодействуют, т. е., например, повышение температуры с 10 до 20 °C вызывает увеличение интенсивности выделения CO_2 при 35%-ой влажности почти в полтора раз больше, чем при влажности 30%.

Несколько по-другому реагирует на гидротермические условия валежник (формула (5.4)):

$$U_{уд} = -0,025192 + 0,000026 \cdot W^2 + 0,000037 \cdot W \cdot t \quad (5.4).$$

Интенсивность выделения CO_2 валежником в среднем в 2 раза выше по сравнению с сухостоем. У обоих объектов наиболее активное дыхание протекает при максимальной влажности. Уменьшение содержания воды в валежнике резко снижает выделение углекислоты, что, вероятно, связано с экологической структурой сообщества микроорганизмов, разрушающих валежник и требовательных к влажности субстрата. Находясь на подстилке, валежник получает влагу, как с осадками, так и за счет явления капиллярности, и редко оказывается сильно пересохшим. Сухостой же в противоположность валежнику, находится в иных условиях и испытывает сильные колебания влажности. Поэтому разрушающие его организмы должны иметь более высокую толерантность к содержанию влаги, и реагировать на ее изменения не так резко.

Время полужизни углерода в древесном отпаде показывает, за какой промежуток времени половина запасенного в древесном отпаде углерода поступит в атмосферу в результате его разложения. На основании обнаруженных закономерностей нами определено время полужизни углерода в древесном отпаде, и зависимость этого показателя от температуры при естественной влажности. Форма зависимости оказалась несколько различной для сухостоя и валежа (формулы (5.5) и (5.6) соответственно).

$$T_{1/2 \text{ сух}} = 0,693 / (-0,10133 + 0,02425 \cdot t) \quad (5.5)$$

$$T_{1/2 \text{ вал}} = 0,693 / (0,078186 + 0,007052 \cdot t) \quad (5.6)$$

Исходя из полученных уравнений и погодно-климатических условий региона исследований, время полужизни углерода в стволах сухостоя составляет 9,98 лет, а в валеже 5,43 года. Другими словами за год теряется 3,4% углерода, запасенного в сухостое и 6,3% углерода валежа. При потеплении климата время полужизни сокращается, что приведет к уменьшению запаса углерода в древесном детрите и снижению углероддепонирующей роли сосновых биогеоценозов.

5.2. Интенсивность выделения углекислого газа лесной подстилкой

Одним из компонентов лесного биогеоценоза, принимающего активное участие в процессе круговорота углерода, является лесная подстилка, формирующаяся за счет опада хвои, листвы, отмерших ветвей и пр. В силу биологических особенностей лесная подстилка в зависимости от погодно-климатических условий, возраста и других характеристик насаждения выступает либо источником, либо стоком углерода. С целью выяснить, как видоизменяется углеродная функция лесной подстилки в случае глобальных изменений условий окружающей среды, была проведена серия экспериментов по изучению интенсивности выделения углерода (в составе CO_2) из лесной подстилки при различных температурных режимах, влажности и техногенной нагрузке.

Удельная скорость выделения CO_2 подгоризонтом лесной подстилки A_0' удаленного от источников загрязнения (контрольного) насаждения составила от $0,0003 \text{ мг } \text{CO}_2 \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}$ (при содержании воды менее 10% и температуре 5°C) до $0,4188 \text{ мг } \text{CO}_2 \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}$ (при оптимальных условиях). Подгоризонт A_0' лесной подстилки из насаждения, находящегося в условиях очень сильного уровня техногенной нагрузки, при тех же условиях, имел немного меньшую активность дыхания.

Как показали наши опыты, продуцирование углекислого газа подгоризонтами A_0'' и A_0''' имеет сходный характер, поэтому они рассматриваются вместе. Скорость выделения CO_2 этими подгоризонтами в контрольном насаждении составила $0,0139 - 0,3863 \text{ мг } \text{CO}_2 \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}$, а в условиях техногенного загрязнения – значительно меньше – $0,0041 - 0,0683 \text{ мг } \text{CO}_2 \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}$.

Собранные данные послужили основой для построения регрессионных уравнений, описывающих интенсивность дыхания в связи с температурой и влажностью объекта исследований (табл. 5.3).

Таблица 5.3

Уравнения связи между удельной интенсивностью дыхания лесной подстилки и ее влажностью и температурой

Вариант опыта	Подгоризонт	Вид регрессионного уравнения
Контроль	A_0'	$U_{\text{уд}} = 0,10581 + 0,000221 \cdot t \cdot w$
	A_0'' и A_0'''	$U_{\text{уд}} = 0,09422 + 0,00855 \cdot t + 0,001208 \cdot w$
В условиях очень сильной техногенной нагрузки	A_0'	$U_{\text{уд}} = 0,0126163 + 0,0002074 \cdot t \cdot w$
	A_0'' и A_0'''	$U_{\text{уд}} = 0,0096163 + 0,0001974 \cdot t \cdot w$

Необходимо отметить, что, хотя у всех изученных объектов наблюдалась тенденция к экспоненциальной зависимости скорости протекания от

температуры, характерной для многих химических процессов, однако статистически она оказалась недостоверной. Поэтому в рассматриваемом диапазоне температур (5 - 30°С) линейная зависимость вполне удовлетворительна.

Анализ полученных уравнений показывает, что интенсивность дыхания зависит от температуры, влажности, степени разложения лесной подстилки и уровня ее техногенного загрязнения. Так, например, для подгоризонта A_0' при 10%-влажности возрастание температуры на 10°С вызывает увеличение интенсивности дыхания в 1,17 раз, а при 70%-ой влажности более чем в 1,5.

Интенсивность дыхания сильноразложившейся подстилки в 2 – 3 раза ниже, а дыхание подстилки, отобранной вблизи источника загрязнения, еще ниже в 3 – 5 раз. Характерной особенностью является изменение характера зависимости процесса от температуры и влажности, что отчетливо видно при сопоставлении соответствующих уравнений (см. табл. 5.3).

Таким образом, процессы разложения лесной подстилки обуславливаются климатическими факторами – ускоряются при возрастании температуры и влажности. Сходные результаты получены Э.Ф. Ведровой и Т.Н. Миндеевой [142, 143], Г.П. Архангельской [163], Moorhead Daryl L. и др. [173]. Техногенный пресс ингибирует процессы разложения лесной подстилки. Об отрицательном воздействии техногенного загрязнения на скорость разложения подстилки упоминают Л.К. Кайбияйнен и др. [82].

5.3. Выделение углекислого газа минеральными горизонтами почвы

Выделение углекислого газа в результате разложения органического вещества почвы является одним из ключевых звеньев круговорота углерода в лесном биогеоценозе. Его величина в значительной мере определяет, насколько эффективно леса могут выводить углекислый газ из атмосферы, смягчая или даже предотвращая парниковый эффект. Интенсивность потока углекислого газа от разложения органического вещества минеральных горизонтов почвы определяется многими факторами, среди которых: содержание в почве органического вещества, температура почвы, доступность влаги, наличие кислорода, азота и других химических веществ [327].

С целью выявления реакции почвы на изменение гидротермических условий нами проведена серия лабораторных экспериментов. В насаждениях сосны искусственного происхождения отбирались образцы почвы на глубине 25 см, т.к. почва этих горизонтов принимает доминирующее участие в выделении углекислого газа [153]. При этом структура почвы по возможности не нарушалась.

Как показывают полученные нами экспериментальные данные, на интенсивность выделения углекислого газа почвой оказывают достоверное влияние, как содержание в ней воды, так и температура. Причем увеличение этих показателей в пределах области исследования ($t = 2\text{--}25\text{ }^{\circ}\text{C}$; $w = 7\text{--}28\%$ от полной почвенной влагоемкости) оказывает положительное влияние на этот процесс. Нами выявлено [328], что при одинаковой влажности зависимость интенсивности выделения от температуры линейна (уравнение 5.11), и введение коэффициентов, придающих зависимости отличный от прямой вид не сказывается на повышении достоверности модели (Табл. 5.4).

$$V = a_0 + a_1 \cdot t \quad (5.11)$$

Таблица 5.4

Коэффициенты уравнений, описывающих зависимость интенсивности выделения углекислого газа от температуры (в диапазоне $5\text{--}25^{\circ}\text{C}$)

Содержание воды, % от полной влагоемкости	a_0	a_1	R^2
7	$-3.84 \cdot 10^{-4}$	$4.85 \cdot 10^{-5}$	0.959
17	$-6.54 \cdot 10^{-4}$	$8.14 \cdot 10^{-5}$	0.923
28	$-9.84 \cdot 10^{-4}$	$1.32 \cdot 10^{-4}$	0.967

Как правило, скорость протекания химической реакции имеет экспоненциальный характер и прямолинейность зависимости, по нашему мнению, обуславливается тем, что в процессе разложения органического углерода почвы участвуют различные виды микроорганизмов, с разными требованиями к температурным условиям, с разным температурным оптимумом. Суммирование потоков углерода от каждого отдельного вида и придает зависимости почти прямолинейный характер. Необходимо отметить, что, при температурах ниже $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ данная зависимость принимает криволинейный характер и асимптоматически приближается к нулю с понижением температуры. При температуре $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ выделения углекислого газа из почвенных образцов практически не происходит.

Анализ полученных результатов (табл. 5.5) показывает, что увеличение влажности от 7% до 28% от полной влагоемкости приводит к повышению отзывчивости процессов разложения на увеличение температуры, т.к. возрастает угол наклона прямой.

Таблица 5.5

Зависимость интенсивности выделения углекислого газа почвой ($\text{мг} \cdot \text{час}^{-1} \cdot \text{кг}^{-1}$) от ее температуры и содержания воды

Содержание воды, % от полной влагоемкости	Температура, °C			
	10	15	20	25
7	0,10	0,34	0,59	0,82
17	0,16	0,56	0,97	1,38
28	0,37	1,03	1,69	2,35

Исходя из полученных результатов, можно сделать заключение: при повышении средней температуры вегетационного периода на каждый 1 °C интенсивность выделения углерода лесными почвами будет повышаться на 11 – 12%. Повышение температуры холодного времени года само по себе не окажет влияния на интенсивность выделения углекислого газа лесными почвами, но удлинившийся вегетационный период приведет к увеличению срока выделения CO_2 , а значит и к дополнительному увеличению его эмиссии за год.

Для оценки возрастания техногенного загрязнения окружающей среды на интенсивность разложения органического вещества почвы была также поставлена отдельная серия лабораторных экспериментов.

Так как основным поллютантом в Республики Беларусь является диоксид серы [288], выделяющийся во многих производственных процессах, для моделирования техногенного загрязнения почвы было применено ее искусственное подкисление сернистой кислотой.

В образцы почвы, отобранные в находящемся в зоне слабой техногенной нагрузки лесном массиве, добавлялся слабый раствор сернистой кислоты в следующих количествах (в пересчете на серу): $500 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ (вариант 1), $2500 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ (вариант 2), $5000 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ (вариант 3). Затем подкисленные образцы почвы инкубировались на протяжении 30 – 40 суток. В качестве контроля служила почва, отобранная в том же лесу, но не подвергавшаяся обработке серной кислотой.

Выделение углекислого газа (рис. 5.1) наблюдалось в трех вариантах влажности почвы (7%, 12%, 28% от полной влагоемкости почвы) и в четырех температурных режимах (5, 10, 15, 20 °C).

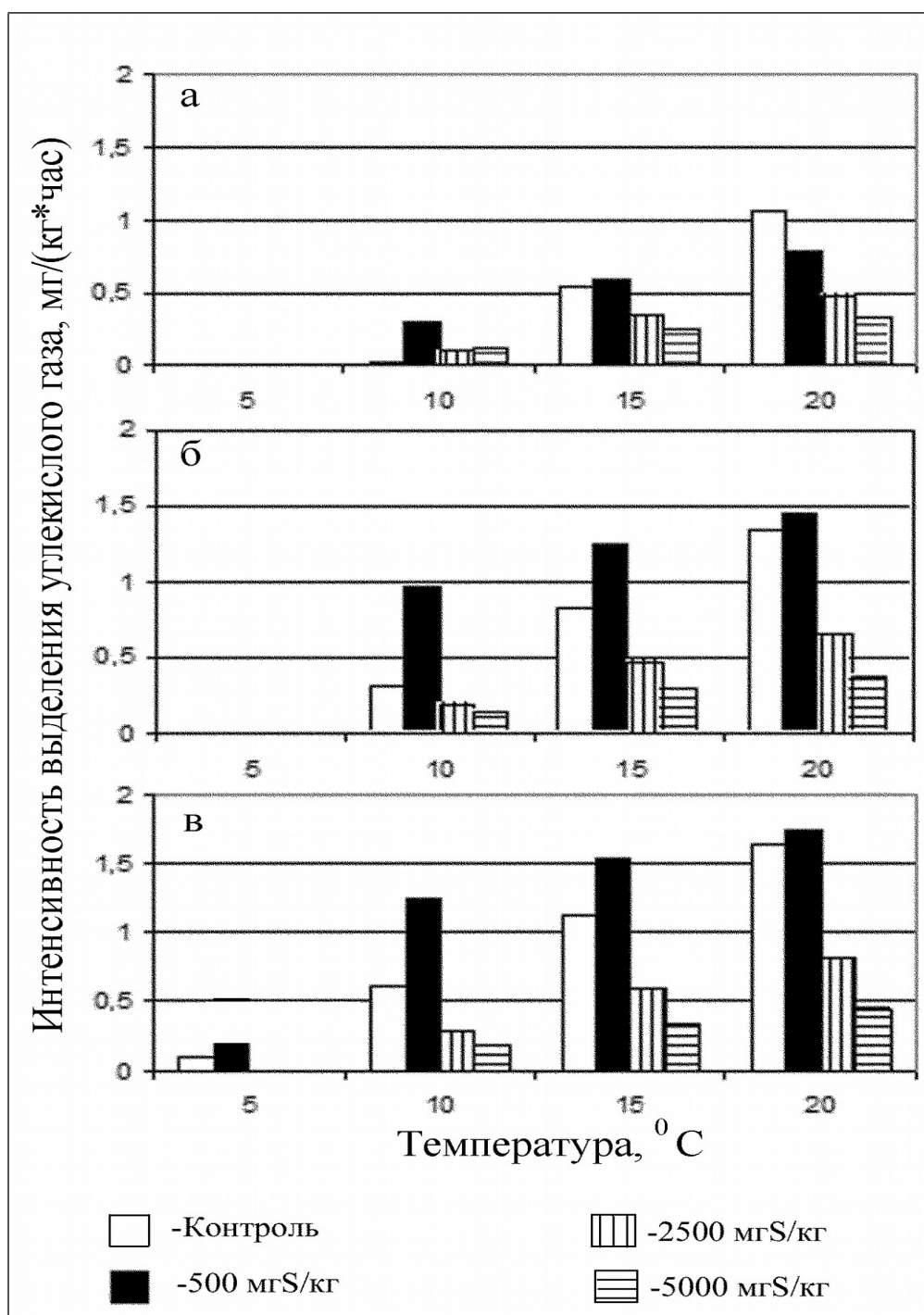


Рис. 5.1. Зависимость интенсивности выделения углекислого газа минеральной частью почвы от ее температуры, относительной влажности и уровня загрязнения серой.

а –влажность 7% от полной влагоемкости, б - 17%, в - 28%.

Относительная влажность, температура и содержание серы (в виде анионов серной кислоты) в почве оказывают сильное комплексное воздействие на интенсивность выделения углекислого газа минеральными горизонтами почвы. Эта интенсивность колеблется от $0,00 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{час}^{-1}$ – в условиях с ми-

нимальной влажностью и температурой до $1,61 - 1,76 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{час}^{-1}$ – при влажности 28% от полной влагоемкости и температуре 20°C .

Минимальное подкисление почвы в абсолютном большинстве случаев вызывало интенсификацию процессов выделения углекислого газа, достигающее 200% от контроля. Усиление выделения углекислого газа при минимальном уровне подкисления наиболее рельефно при низких температурах и высокой относительной влажности.

Добавление 2500 и $5000 \text{ мгS} \cdot \text{кг}^{-1}$ почвы ведет к резкому (в 2 – 3 раза) снижению интенсивности выделения углекислого газа по сравнению с контролем. Исследованиями М.В. Медведевой [329] установлено, что в зоне эмиссий Костомукшского ГОКа усиливается скорость минерализации клетчаткосодержащих веществ в органогенном горизонте почвы. Это сходно с результатами, полученными нами в варианте со слабым подкислением.

Таким образом, техногенное загрязнение почв лесного биогеоценоза приводит к усилению выделения углекислого газа минеральными горизонтами почвы, что ведет к снижению его углероддепонирующей функции. Однако возрастание уровня техногенной нагрузки затормаживает процессы разложения органического вещества почвы, и снижает интенсивность ее дыхания. Такое явление несколько компенсирует падение углеродной функции лесного биогеоценоза от снижения скорости накопления его в биомассе.

Выводы

1. Проведенные эксперименты позволили установить, что интенсивность выделения углекислого газа древесным детритом имеет положительную связь с влажностью и температурой и отрицательную – с его условной плотностью, независимо от срока разложения детрита.
2. Установлено увеличение интенсивности выделения углекислого газа лесной подстилкой при повышении ее температуры и влажности, а также усиление ингибирования этого процесса с нарастанием техногенного пресса.
3. Регрессионный анализ позволил установить, что зависимость выделения углекислого газа минеральными горизонтами почвы от температуры в диапазоне $5 - 25^\circ\text{C}$ носит линейный характер. Последовательное увеличение влажности почвы с 7% до 28% от полной влагоемкости вызывает рост интенсивности выделения углекислого газа и повышает чувствительность почвенного дыхания к изменениям температуры.

4. Установлено, что при незначительном ($500 \text{ мгS} \cdot \text{кг}^{-1}$ почвы) техногенном загрязнении почв интенсивность выделения CO_2 почвой увеличивается по сравнению с контролем на величину от 20 до 200%, в зависимости от условий увлажнения и температуры.

ГЛАВА 6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ И ПРОГНОЗ НАКОПЛЕНИЯ УГЛЕРОДА В СОСНОВЫХ КУЛЬТУРЦЕНОЗАХ

6.1. Имитационная модель роста древостоя и накопления углерода в сосновых культурценозах

Растительные сообщества можно охарактеризовать как «многомерные», полифакторно детерминированные, нестрогие системы [330]. Такие свойства значительно усложняют их изучение, классификацию и моделирование происходящих в них процессов. Одним из самых сложных является моделирование биопродукционного процесса, который по своей сути неоднороден, и состоит из нескольких составляющих, подверженных воздействию многочисленных внешних и внутренних факторов: 1) внутреннее состояние биоценоза – возраст, плотность популяции, болезни, вредители и пр.; 2) внешние эдафические – богатство почвы минеральными элементами питания, водообеспеченность, механический состав почвы; 3) погоднo-климатические – среднегодовая температура, распределение температуры по сезонам года, сумма выпадающих осадков, продолжительность вегетационного периода и пр.; 4) антропогенные – рубки леса, техногенное и радиационное загрязнение территории и пр. В процессе моделирования выделяют ведущие факторы, оказывающие наиболее сильное воздействие на продукционные процессы, воздействие остальных факторов закладывается в ошибку модели. Наиболее распространенным типом в моделировании продукционных процессов являются детерминационные модели, в которых показатели продуктивности насаждения связаны жесткой функциональной зависимостью с одним или несколькими факторами-предикторами (возраст, бонитет, агрохимическая характеристика почв, полнота и т.д.). Для выражения таких зависимостей применяют зарекомендовавшие себя формулы: полиномы, функции Хосфельда, Митчерлиха, Вейбула и пр. [318], или методы Буркхарта, Вуокилы и др. [331].

Как отмечает М. Zasada [240] модели развития и продукционных процессов в лесных сообществах помогают лучше понять процессы роста насаждения, позволяют провести эксперименты, которые невозможны или трудноосуществимы в натуре, и облегчают планирование лесоустроительных работ. Имея адекватную модель элементарной популяции, исследователь может немедленно наблюдать основные результаты антропогенного или иного воздействия на насаждение в любой момент времени [332].

На наш взгляд, наиболее удобным в моделировании динамики продукционных процессов в биогеоценозах является использование имитационных моделей, в основу которых заложена не детерминационная зависимость выходных показателей от сигнала на входе, а вероятностный отклик, что наиболее точно отображает характер функционирования сложных природных систем. Имитационная модель – это формальное (т.е. выполненное на некотором формальном языке) описание логики функционирования исследуемой системы и взаимодействия отдельных ее элементов во времени, учитывающее наиболее существенные причинно-следственные связи, присущие системе, и обеспечивающее проведение статистических экспериментов [333 с. 35]. Поскольку основой имитационного моделирования является метод статистических испытаний, наибольший эффект от его применения достигается при исследовании сложных систем, на функционирование которых существенное влияние оказывают случайные факторы.

К разрабатываемой нами модели накопления углерода сосновым древостоем предъявлялись следующие требования: минимально возможное количество параметров на входе; учет внутреннего состояния экосистемы, условий произрастания, воздействия человека (рубки ухода и техногенное загрязнение), изменения погодно-климатических условий; максимально-возможная точность предсказания.

Структура модели (рис. 6.1) в общем отражает структуру продукционных процессов древостоя, подвергающуюся воздействию ряда внешних и внутренних факторов. На вход модели [334] поступает информация о начальном состоянии экосистемы (А), информация о погодно-климатических условиях (Б), уровне техногенной нагрузки (В), программе рубок ухода (Г). На выходе (Д) модели снимается информация о распределении запасов углерода по компонентам древостоя в возрастном разрезе. Для расчета запасов углерода, входящая информация обрабатывается в ряде блоков: 1 – блок расчета таксационных показателей насаждения (средний диаметр, густота, возраст, сумма площадей поперечного сечения); 2 – блок расчета прироста деревьев по диаметру; 3 – блок расчета отпада; 4 – блок расчета рубок; 5 – блок расчета запаса углерода во фракциях древостоя, вырубленных в результате промежуточного пользования и в отпаде; 6 – блок расчета коэффициентов техногенного воздействия на отпад и прирост; 7 – блок расчета погодно-климатических коэффициентов; 8 – генератор случайных чисел.

Инициализационная информация (данные о густоте, бонитете, среднем диаметре, возрасте насаждения, распределении деревьев по диаметру) подвергаются первичной обработке и заносятся в соответствующие переменные. Далее в блок расчета прироста по диаметру поступает

информация о внутреннем состоянии экосистемы, распределении деревьев по диаметру, а также коэффициенты учета погоднo-климатических условий, содержания CO_2 в атмосфере и техногенной нагрузки. Прирост каждого дерева в матрице распределения по диаметрам осуществляется раздельно. На выходе данного блока получается информация о распределении деревьев по диаметру на следующий год.

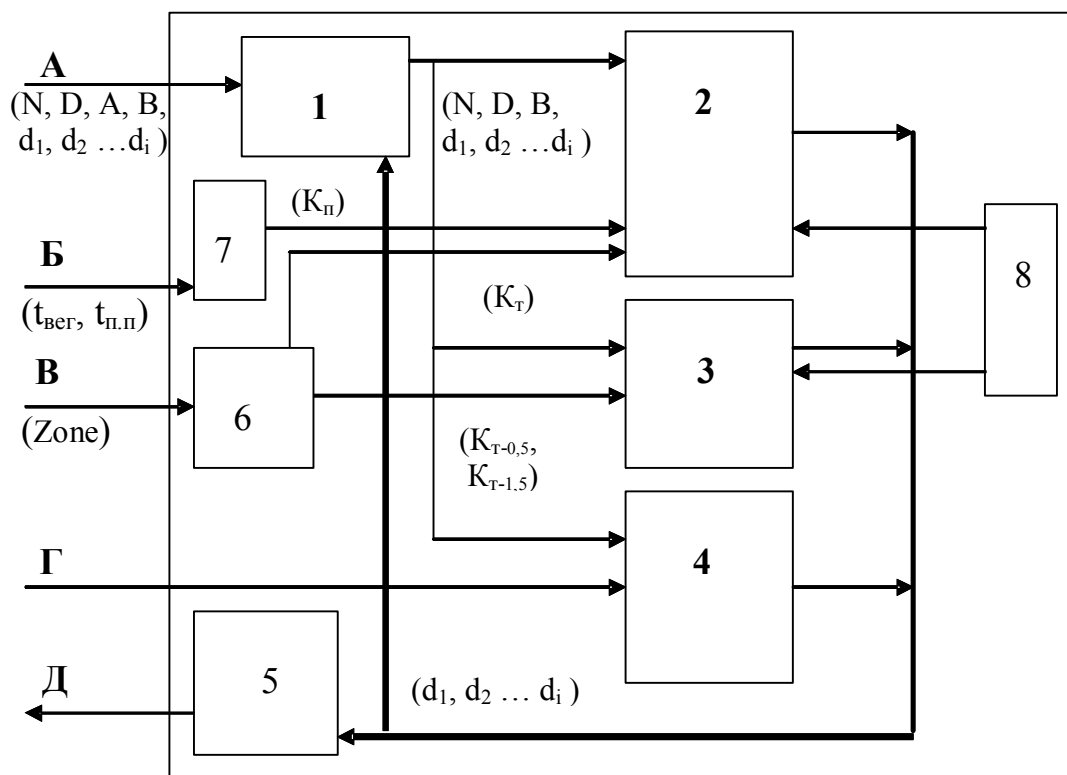


Рис.6.1. Принципиальная схема модели накопления углерода древостоем (пояснения в тексте)

В результате анализа первичных данных оказалось, что наиболее рационально производить не прямой расчет прироста деревьев по диаметру, а рассчитывать прирост по площади поперечного сечения, с последующим переводом в прирост по диаметру. С использованием корреляционного и регрессионного анализа произведен подбор факторов, оказывающих доминирующее влияние на прирост площади поперечного сечения ствола, и найдено соответствующее уравнение (6.1).

$$dS = -16,4122 + 15,32260 \cdot RD + 0,4154 \cdot B + 0,06690 \cdot a - 2,05861 \cdot N \cdot D / 10000 \quad (6.1)$$

где dS – прирост площади поперечного сечения дерева, см^2 ;
 RD – редуционное число по диаметру;
 a – возраст дерева, лет;
 N – густота насаждения, шт./га.

В уравнение вошли четыре показателя:

1. Редуционное число по диаметру [284, с. 262], т.е. отношение диаметра дерева к среднему диаметру древостоя, характеризующее положение дерева в насаждении. Исследования показали, что на редуционное число приходится наибольшая доля объясненной вариации прироста. Независимо от возраста, бонитета и других признаков насаждения прослеживается четкая закономерность увеличения прироста дерева с ростом редуционного числа (рис. 6.2).

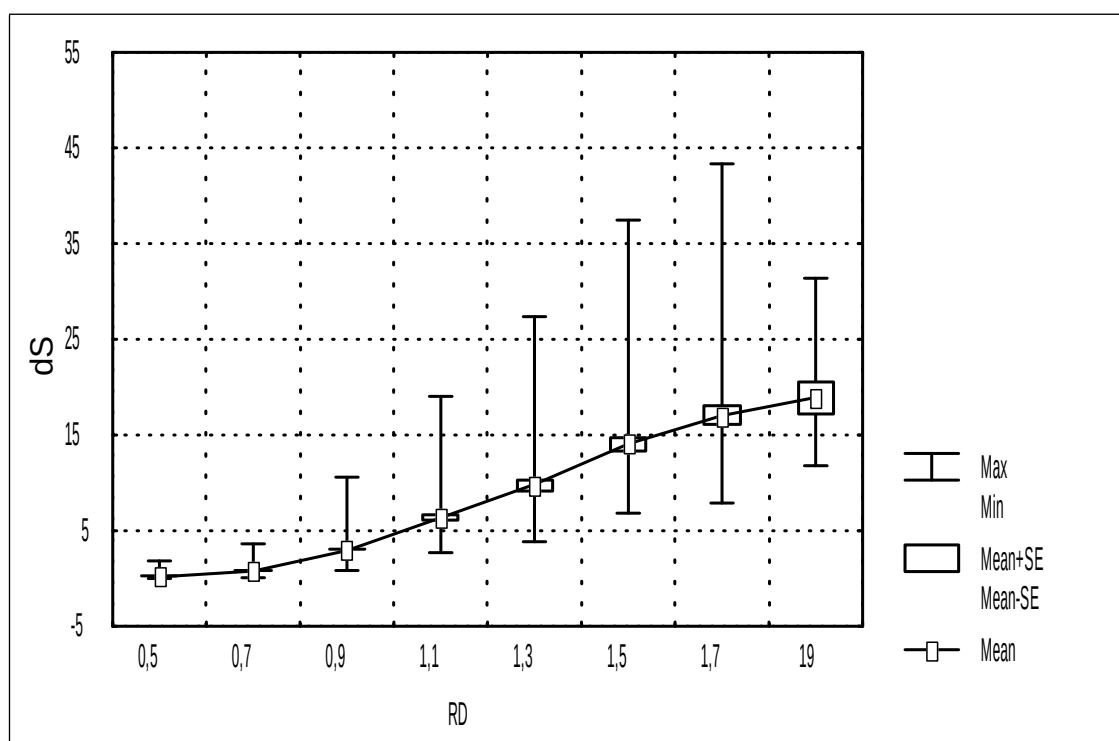


Рис. 6.2. Зависимость прироста площади поперечного сечения дерева (dS , см) от редуционного числа (RD)

1. Показателем, характеризующим степень благоприятности условий произрастания, явился бонитет насаждения, выраженный средней высотой древостоя в базовом возрасте – 100 лет. Как замечает ряд исследователей [102, 273], выражение бонитета в виде высоты в базовом возрасте является

весьма удобным при необходимости включения его в модели тех или иных процессов происходящих в лесных биогеоценозах.

2. Довольно сильное влияние на прирост площади сечения дерева оказывает его возраст.

4. Интенсивность внутривидовой конкуренции, естественно, оказывающей влияние на прирост дерева, наиболее рационально удалось выразить с помощью произведения среднего диаметра насаждения и его густоты. Физиологическое обоснование данного показателя дано ниже в описании блока расчета отпада деревьев (стр. 95). Приведенное уравнение (6.1) объясняет 76,3% вариации прироста.

Для учета влияния изменения погодно-климатических условий и техногенной нагрузки введены соответственно погодный (K_p) и техногенный (K_t) коэффициенты. Эти коэффициенты показывают во сколько раз изменится прирост дерева по площади поперечного сечения в случае отклонения условий от средних. В результате корреляционного анализа выяснено, что наибольшее влияние на прирост в условиях региона исследований оказывает средняя температура за вегетационный период (май - август) – $t_{\text{вег}}$ и средняя температура за период покоя (сентябрь – апрель) – $t_{\text{п.п}}$ [335]. Причем первая оказывает на прирост отрицательное влияние, а вторая положительно. Об отрицательном влиянии низких температур периода покоя и положительном влиянии высоких температур ранней весны (так же относимой нами к периоду покоя) сообщается в работе В.Е. Вихрова и Р.Т. Протасевича [336]. Обнаруженная ими достоверная зависимость прироста деревьев от суммы осадков за гидрологический год в нашем случае статистически не подтвердилась. Исследования И.В. Гуняженко [337] тоже свидетельствуют о сильном влиянии количества осадков за гидрологический год на прирост деревьев. Однако он проводил исследования в сосняке вересковом, где, как правило, испытывается дефицит почвенной влаги. Этот же автор отмечает, что лучший прирост сосны наблюдается в годы с несколько пониженной температурой в период наиболее сильного роста, что выявлено и в нашем случае. Отрицательное влияние повышения температуры в вегетационный период на прирост по площади сечения можно объяснить климатическими особенностями региона исследования (см. главу 2, с. 31), повышение температуры, как правило, связано с увеличением дефицита влаги, что отрицательно сказывается на фотосинтезе. Уравнение (6.2) для расчета погодного коэффициента (блок 7) выглядит следующим образом:

$$K_p = 0,9850774 - 0,004592 \cdot t_{\text{вег}} + 0,139932 \cdot t_{\text{п.п}} \quad (6.2)$$

Для выражения уровня техногенной нагрузки на насаждение взято за основу деление на зоны комплексного воздействия токсикантов на природные экосистемы, выделенные В.В. Степанчиком и др. [288]. При этом каждой зоне приравнено соответствующее числовое значение (Zone): 3 - зона деградации древостоя; 2 - зона сильного воздействия; 1 - зона среднего воздействия. Техногенный коэффициент определялся в блоке 6 с помощью следующего уравнения (6.3):

$$K_T = 1,140 - 0,083 \cdot \text{Zone} \quad (6.3)$$

Хотя А.С. Алексеев [338] для описания влияния на прирост дерева уровня техногенного загрязнения рекомендует криволинейную зависимость, статистически, приводимая им функция, в наших исследованиях не подтвердилась. Это можно отчасти объяснить тем, что в расчетах отсутствуют деревья, произрастающие в регионах без техногенной нагрузки, т.к. такие места на территории региона исследований практически отсутствуют. Вполне удовлетворительной для описываемого явления оказалась простая линейная функция [339].

При учете описанных выше коэффициентов объясняется 87,4% вариации прироста поперечного прироста ствола.

Кроме перечисленных факторов оказалось необходимым учитывать влияние повышения содержания углекислого газа в атмосфере. На основании результатов исследований влияния повышенного содержания углекислого газа в атмосфере на прирост по площади поперечного сечения сосны, проведенных Jason G. Hamilton и др. [71], а так же с учетом выявленных общих для растений закономерностей влияния повышения содержания углекислого газа в атмосфере на их рост [340, 341], нами выведено уравнение для расчета коэффициента (K_{CO_2}), показывающего во сколько раз увеличится прирост поперечного сечения ствола отдельного дерева, при повышении концентрации углекислого газа в атмосфере на 1 ppm (формула (6.4)).

$$K_{CO_2} = 0,55 + 0,00125 \cdot C_{CO_2}, \quad (6.4)$$

где C_{CO_2} – концентрация углекислого газа в атмосфере, ppm.

Остаточная вариация имитировалась с помощью генератора случайных чисел. Оказалось, что величина остаточной дисперсии (S) тесно связа-

на с величиной прироста площади поперечного сечения. Эта связь выражается формулой (6.5).

$$S=0.615178+0.358075 \cdot dS \quad (6.5)$$

Итоговое выражение для расчета прироста дерева по диаметру, с учетом вышеизложенного, выглядит следующим образом (6.6):

$$D_{i+1} = D_i + \sqrt{\frac{\pi \cdot dS \cdot Kn \cdot Km \cdot Kco2}{4}} + f(S, n), \quad (6.6)$$

где D_i – диаметр дерева в текущем году;
 D_{i+1} – диаметр дерева в следующем году;
 $f(S, n)$ – функция, генерирующая случайные числа с нормальным распределением на основании случайного числа n и остаточной дисперсии S .

В третьем блоке на основании матрицы распределения по диаметру, данных о внутреннем состоянии экосистемы, и уровня техногенной нагрузки определяется вероятность отпада каждого дерева. Используемая модель естественного отпада базируется на следующих положениях:

- 1) Интенсивность отпада различна для деревьев разных классов крупности (чем больше относительная величина дерева в древостое, тем меньше вероятность его отпада).
- 2) Интенсивность отпада определяется напряженностью внутривидовой конкуренции (чем она выше, тем с большей интенсивностью происходит отпад).
- 3) Деревья разных классов крупности по-разному реагируют на обострение или ослабление внутривидовой конкуренции и внешних факторов.

Учет вышеприведенных положений рекомендует Г.П. Карев [342] при математическом моделировании естественного изреживания древостоев.

Для отнесения дерева к тому или иному классу крупности использованы редуccionные числа. Возможность использования редуccionных чисел в моделировании древесного отпада показана В.А. Вагиным [343]. Деревья в древостое разделены на 7 классов редуccionных чисел: 0,5; 0,7; 0,9; 1,1; 1,3; 1,5; 1,7. Среднее распределение деревьев по классам редуccionных чисел (рис. 6.3) близко к нормальному, с небольшим смещением влево. Статистический анализ не выявил зависимости характера распределения от возраста древостоя.

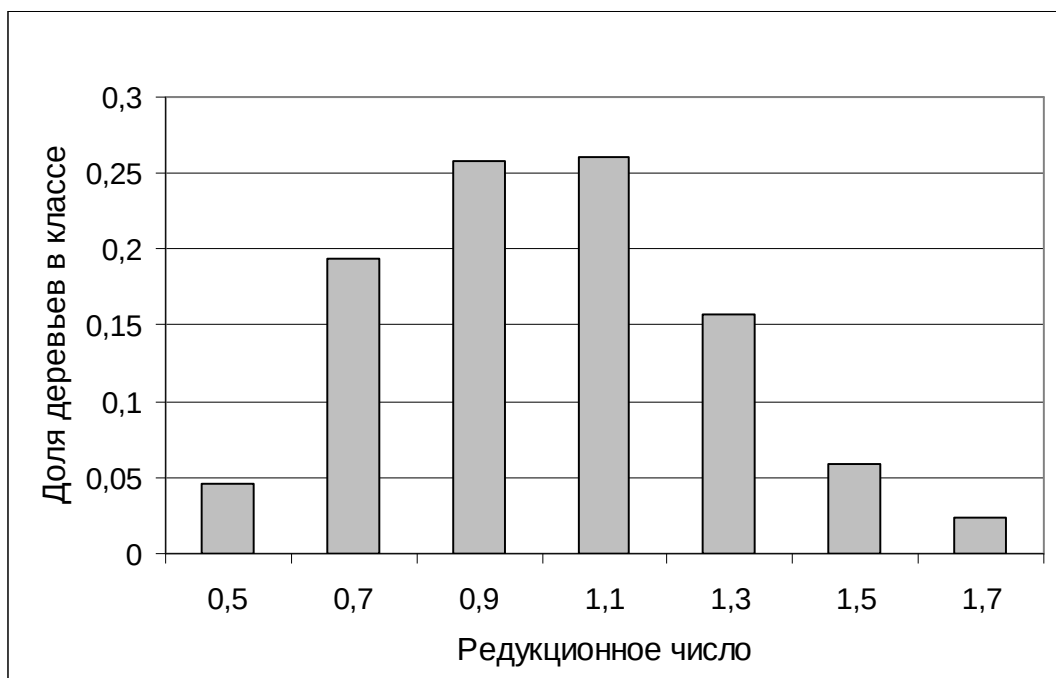


Рис. 6.3. Среднее распределение деревьев по классам редуционных чисел

Наиболее высокая доля отпадающих деревьев характерна для низких редуционных чисел (рис. 6.4). С увеличением относительной крупности деревьев, вероятность их гибели резко уменьшается с 0,234 (редуционное число – 0,5) до 0,004 (1,5). У деревьев в классе редуционного числа 1,7 вероятность отпада несколько увеличивается, что, вероятно, объясняется их низкой долей участия в древостое (см. рис. 6.2). В абсолютных величинах отпад деревьев (по числу стволов) монотонно уменьшается при увеличении редуционного числа.

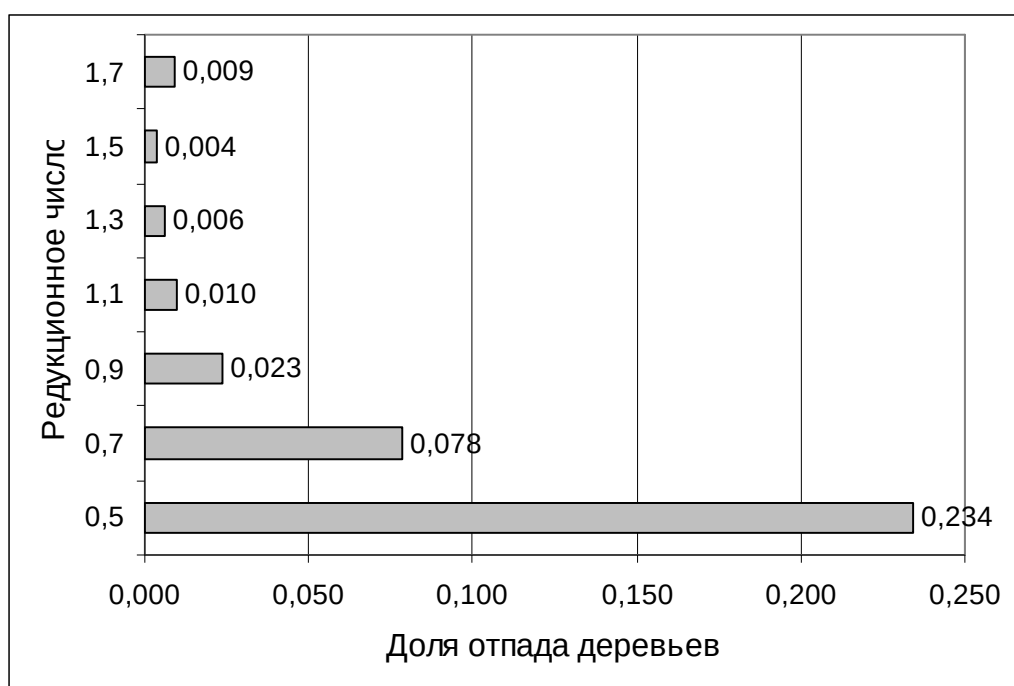


Рис. 6.4. Средняя доля отпада деревьев, принадлежащих к различным классам редуционных чисел

В качестве показателя напряженности внутривидовой конкуренции наиболее целесообразным оказалось использование произведения среднего диаметра насаждения на его густоту [344]. Обоснованность применения этой величины можно объяснить с физиологической точки зрения. Исследования пропорций между заболонной и ядровой древесиной у сосны обыкновенной, проведенные Björklund L. [345], показывают, что площадь заболони пропорциональна диаметру ствола. Заболонь же является во многом определяющим показателем физиологической активности дерева, а значит и степени его фитоценоотического влияния на среду. А произведение среднего диаметра на густоту пропорционально общей площади поперечного сечения заболонной древесины насаждения, значит должно быть пропорционально напряженности использования ресурсов среды. Достоверной оказалась связь между показателем напряженности внутривидовой конкуренции и вероятностью отпада только у деревьев с низкими редуцированными числами (формулы (6.7), (6.8)).

$$p_{0,5} = 0,0735 + 0,0643 \cdot D \cdot N / 10000, \quad (6.7)$$

$$p_{0,7} = 0,0368 + 0,0163 \cdot D \cdot N / 10000, \quad (6.8)$$

где p_i – доля отпада стволов класса редуцированного числа i ;

Как видно из приведенных уравнений, деревья класса редуцированного числа 0,5 более чувствительны к изменению напряженности внутривидовой конкуренции, чем несколько более крупные. Те же, у которых редуцированное число больше или равно 0,9 не показали статистически достоверной зависимости вероятности гибели от показателя конкуренции.

Выяснено, что вероятность отпада деревьев большинства классов редуцированных чисел (кроме 1,7) тесно связана с уровнем техногенной нагрузки. Эта связь опосредована при помощи техногенных коэффициентов вероятности отпада, рассчитываемых в блоке 7 (формулы (6.9) – (6.14)).

$$K_{т0,5} = 1.05 - 0.075 \cdot Zone + 0.025 \cdot Zone^2 \quad (6.9)$$

$$K_{т0,7} = 1.0125 - 0.0275 \cdot Zone + 0.0125 \cdot Zone^2 \quad (6.10)$$

$$K_{т0,9} = 1.025000 - 0.041000 \cdot Zone + 0.015000 \cdot Zone^2 \quad (6.11)$$

$$K_{т1,1} = 1.010000 - 0.022000 \cdot Zone + 0.010000 \cdot Zone^2 \quad (6.12)$$

$$K_{т1,3} = 1.002500 - 0.012500 \cdot Zone + 0.007500 \cdot Zone^2 \quad (6.13)$$

$$K_{т1,5} = 1.000000 - 0.007000 \cdot Zone + 0.005000 \cdot Zone^2 \quad (6.14)$$

Исходя из анализа приведенных уравнений, можно заключить, что с увеличением уровня техногенной нагрузки вероятность отпада практически всех деревьев, кроме самых крупных, увеличивается. Зависимости вероятности естественного отпада деревьев от изменения погодных условий выявлено не было.

На основании программы рубок ухода, выраженной в виде процента выборки объема сырораствующей древесины в определенном возрасте и матрицы распределения стволов по диаметру в блоке 4 рассчитываются последствия рубки ухода. В сосновых насаждениях основным методом рубок ухода является низовой. Поэтому элиминировались стволы с минимальным диаметром, до тех пор, пока объем выбранной древесины не достигал необходимой величины.

После всех вышеописанных процедур матрица распределения по диаметрам снова попадает в блок расчета таксационных показателей, и цикл повторяется снова: производится расчет изменения продукционных показателей насаждения в следующем году.

На основании данных о распределении деревьев по диаметрам за каждый год и вычисленных таксационных показателей по коэффициентам уравнений 3.6, 3.7, представленным в таблице 3.12 (см. гл. 3, с. 56) рассчитывалась возрастная динамика накопления углерода во фракциях древостоя, в отпаде и вырубаемой древесине (блок 5). При моделировании учитывались процессы разложения вырубленной древесины и древесины поступившей в отпад. Для углерода в древесине вырубленной в результате промежуточного пользования время полужизни в составе органического вещества принято в соответствии с рекомендациями [58] за 5 лет. Срок полужизни углерода в древесной мормомассе рассчитывался, исходя из найденных нами зависимостей (уравн. (5.5), (5.6)). Остаток углерода в вырубленной древесине и древесном детрите вычислялся исходя из известной функции (6.15):

$$m_{i+1} = m_i \cdot 2^{(-1/T)}, \quad (6.15)$$

где m_{i+1} – остаток запаса углерода в текущем году, т·га⁻¹;
 m_i – запас углерода в предыдущем году, т·га⁻¹;
 T – период полужизни углерода, лет;

Область применения созданной модели: сосновые древостой, возраст насаждения – 10...90 лет; бонитет – I^a...III; полнота 0,6...1,3; уровень тех-

ногенного загрязнения – от низкого до деградации древостоя; изменения среднегодовой температуры воздуха ± 4 °С от среднего многолетнего.

Представленная модель реализована в виде программы написанной автором на языке Object Pascal с использованием объектно-ориентированного подхода.

Завершающим этапом разработки модели явилась оценка ее качества. Для этого проводилось сравнение откликов модели с наблюдениями за развитием насаждений на пробных площадях, которые были специально исключены из этапа разработки модели. В качестве примера (рис. 6.5) показаны запасы углерода в стволовой древесине, анализ по остальным фракциям показал аналогичные результаты.

В вариантах *а* и *б* отображены результаты сравнения модели с ростом насаждений III и IV классов возраста соответственно. Из всех рассмотренных случаев наибольший разброс между результатами моделирования и реальными данными наблюдается в случае *б*, однако при детальном рассмотрении заметно, что к концу периода сравнения результаты начинают сходиться. Из чего можно сделать вывод, что относительно большая разница вызвана воздействием, случайных, неучитываемых факторов (ими могли быть, например, погодная аномалия, вспышка численности насекомых вредителей или, что-либо подобное). Впоследствии результат действия этих факторов нивелируется, и реальные данные сближаются с модельными.

В вариантах *в* и *г* результаты моделирования сравнивались с ходом накопления углерода насаждениями II класса возраста. Насаждение в варианте *г* подверглось рубке ухода. Высокая сходимость результатов показывает, что модель корректно имитирует реакцию насаждения на проведение рубок. В вариантах *д* и *е* насаждения находились под влиянием техногенного загрязнения, в зоне сильного техногенного воздействия и зоне деградации древостоя, соответственно. В обоих случаях результаты моделирования оказались удовлетворительными.

Разница между фактическими данными и результатами моделирования во всех случаях не превышала 5%, а в большинстве из них была значительно ниже. Соответствие отклика модели фактическим данным проверялось с помощью критерия соответствия χ -квадрат. Соответствие результатов моделирования реальным данным подтвердилось на уровне значимости 0,05 ($\chi_{\text{теор}} = 7,81 - 25 > \chi_{\text{факт}} = 3,4 - 0,1$). На основании результатов проверки рассчитана максимальная относительная ошибка модели на уровне значимости 0,05 – 3,8%, которая подтвердила достаточный уровень адекватности, устойчивости и чувствительности разработанной модели, что делает возможным ее применение для прогнозирования депонирования

углерода сосновыми насаждениями, произрастающими в условиях удовлетворяющих области применения модели.

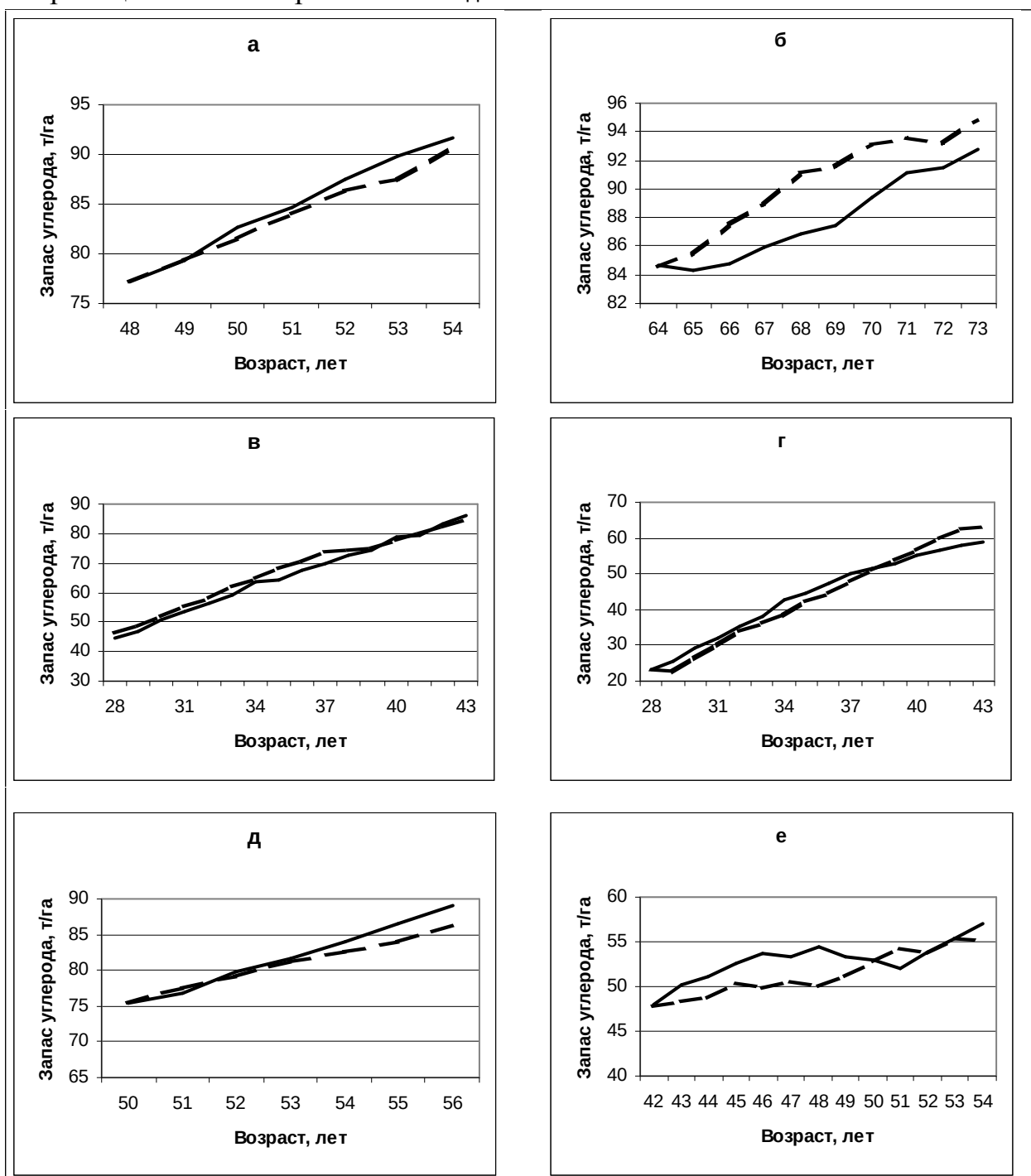


Рис. 6.5. Результаты проверки адекватности модели.

—— Фактические данные; — — — Результаты моделирования.

а – бонитет I^a, полнота – 1,1, густота – 1280 шт./га, зона среднего уровня техногенной нагрузки; б – бонитет I, полнота – 1,0, густота – 884 шт./га, зона среднего уровня техногенной нагрузки; в – бонитет I, полнота – 1,1, густота – 5480 шт./га, зона среднего уровня техногенной нагрузки; г – бонитет I, полнота – 0,9, густота – 4690 шт./га, зона среднего уровня техногенной нагрузки; д – бонитет I, полнота – 1,0, густота – 1123 шт./га, зона сильного уровня тех-

ногенной нагрузки; е – бонитет II, полнота – 0,8, густота – 1100 шт./га, зона деградации древостоя.

6.2. Результаты моделирования динамики накопления углерода в сосновых культурфитоценозах

6.2.1. Влияние условий произрастания и начальной густоты на динамику накопления углерода культурами сосны

В качестве показателей, оценивающих лесорастительный эффект условий местопроизрастания, следует использовать класс бонитета или тип леса. Но последний трудно поддается формализации при применении методов множественной регрессии. Поэтому в подобных исследованиях в качестве классификационного признака обычно применяется класс бонитета [247]. Начальная густота моделируемых насаждений – 4 тыс.шт./га, классы бонитета: I^a (высота в базовом возрасте 100 лет – 32,57 м), I (высота в базовом возрасте 28,85 м), II (высота в базовом возрасте 25,14 м).

Результаты моделирования свидетельствуют о том, что интенсивность накопления и масса накопленного углерода в значительной степени зависят от бонитета насаждения. Так к 50 годам в насаждениях I^a бонитета накапливается 191 т·га⁻¹ углерода (рис. 6.6), а к 85 – 279 т·га⁻¹. Основная масса углерода сосредоточена в составе древесины ствола (60% – 65%). В кроне сосредоточено 6% – 14%, с возрастом доля углерода запасенного во фракциях кроны снижается.

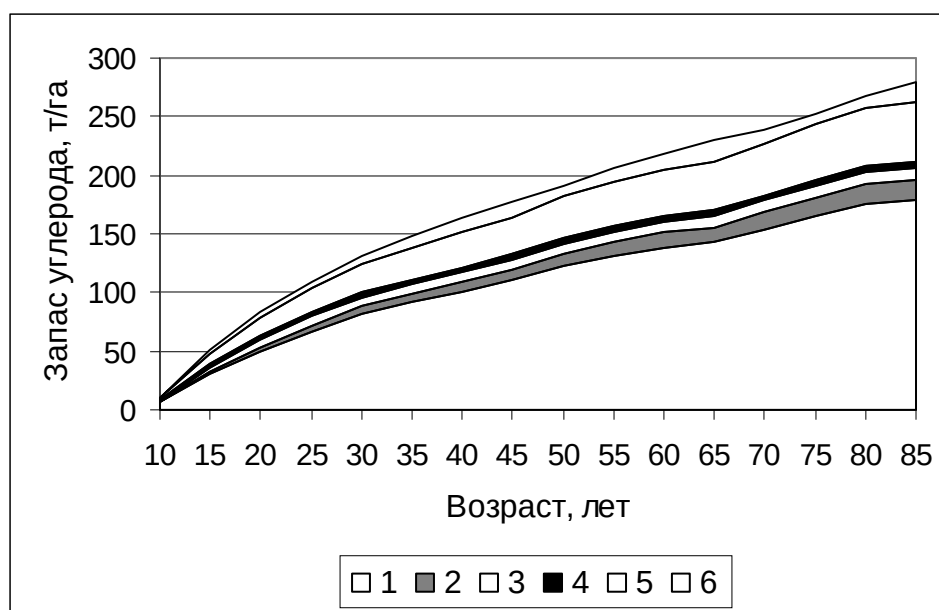


Рис. 6.6. Возрастная динамика накопления углерода сосновыми культурфитоценозами I^a бонитета.

1 – древесина ствола; 2 – кора ствола; 3 – корни; 4 – ветви; 5 – хвоя; 6 – древесный детрит.

Запас углерода в древесном детрите в начале развития насаждения весьма незначителен, к 35 годам он достигает величины $10 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, в дальнейшем он увеличивается, но темпы этого процесса резко снижаются. В большинстве случаев доля углерода детрита составляет 4% – 7% от общего запаса.

Наиболее высокие темпы накопления углерода характерны в возрасте до 30 – 40 лет ($3 - 7 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$), затем они снижаются, но накопление углерода остается на довольно высоком уровне. Основной фракцией накапливающей углерод является древесина ствола, запас углерода в ней возрастает на $110 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ за возрастной промежуток между 10 и 80 годами, второй по значимости фракцией являются корни ($46 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ за тот же промежуток времени).

Моделирование показывает, что суммарный запас углерода в насаждении I бонитета меньше на 18% – 22% по сравнению с насаждениями I^a бонитета, и составляет в 50 лет $152 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, а в 80 – $216 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ (рис. 6.7). Доля углерода накопленного в стволе составляет 65% – 72%, при этом 60% – 66% приходится на древесину, и 3% – 6% на кору. В хвое, к возрасту 50 лет, накапливается $3,6 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ углерода (за весь срок моделирования доля хвои составляет 2% – 7% от общего запаса, уменьшаясь с возрастом). В целом крона составляет 6% – 14 % общего запаса углерода. Запас углерода в древесном детрите с возрастом постепенно увеличивается, и в 50 лет составляет $8 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ (около 5% от общего запаса), в дальнейшем он испытывает незначительные колебания около этого значения.

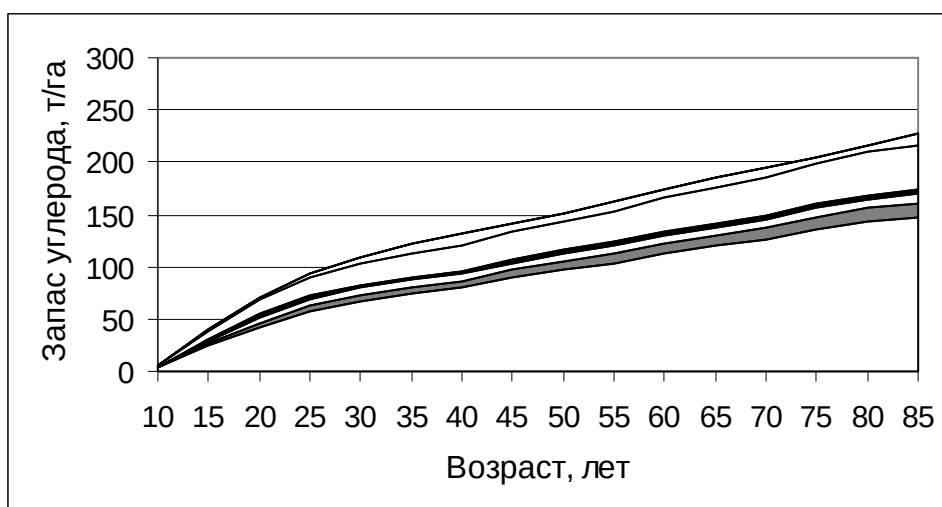


Рис. 6.7. Возрастная динамика накопления углерода сосновыми культурами I бонитета.

Условные обозначения см. рис. 6.6.

Интенсивное накопление углерода в насаждениях I бонитета заканчивается несколько раньше, чем в вышерассмотренном варианте. До 30 лет ежегодное накопление составляет $3,2 - 6,9 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. После этого срока текущая интенсивность накопления углерода в насаждении снижается до $2,0 - 2,6 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$. Как и в насаждениях I^a бонитета основными объектами стока выступают древесина ствола и корни.

Запасы углерода в насаждениях II бонитета не подвергающихся рубкам ухода составляют 81% – 85% от таковых в насаждениях I бонитета; суммарный запас изменяется от $61 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ в 20 лет, до $130 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ в 50 и $174 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ в 80 (рис. 6.8). Доля древесины ствола составляет 61% – 67%, увеличиваясь с возрастом. В корнях сосредоточено 18% – 19% общего запаса углерода, а в кроне – 6% – 14%. Древесный детрит накапливает к 40 годам запас углерода $8 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, и это значение мало изменяется до 85 лет. Доля детрита в суммарном запасе углерод – 2% – 10%. Она постепенно увеличивается до 30 – 40 лет, а затем медленно снижается.

Высокие значения величины текущего накопления углерода наблюдаются в возрасте 15 – 30 лет ($2,4 - 6,2 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$), в дальнейшем она падает до $1,5 - 2,0 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$.

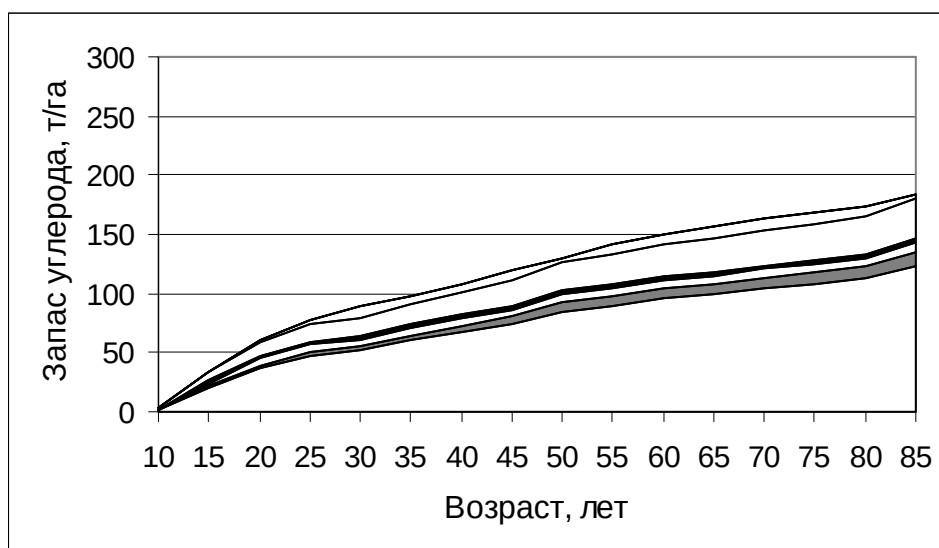


Рис. 6.8. Возрастная динамика накопления углерода сосновыми культурфитоценозами II бонитета.

Условные обозначения см. рис. 6.6.

Таким образом, при понижении бонитета насаждения на 1 класс, запас углерода в нем падает в среднем на 20%. В результате исследования биомассы сосновых насаждений различных бонитетов В.В.Ильинским [346] установлена приблизительно 20%-ная разница между насаждениями сосны

I и II бонитетов. Распределение запаса по отдельным фракциям при этом остается идентичным. Сходные, с полученными нами, пропорции биомассы отдельных фракций найдены и другими исследователями [347, 348]. Более интенсивно углерод накапливается в насаждениях высших бонитетов (средняя интенсивность накопления углерода в насаждениях I^a бонитета к 80 годам составляет – $3,3 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$, тогда как в насаждениях II бонитета – $2,2 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$). В насаждениях, имеющих более низкий бонитет, период интенсивного накопления углерода заканчивается несколько раньше, по сравнению с высокобонитетными.

Определенный интерес представляет различия в возрастной динамике накопления углерода насаждениями с различной начальной густотой. Нами опробованы варианты с густотой посадки 2, 4, 7 и 10 тыс. шт./га, без проведения рубок ухода. В работе представлены результаты моделирования только для насаждений I бонитета (рис. 6.9).

Как видно из рисунка, на рассматриваемом возрастном интервале самые низкие запасы углерода в древостое имеют насаждения с начальной густотой 2 тыс. шт./га, не более 80% от остальных вариантов. Однако разрыв с более густыми культурами постепенно уменьшается с возрастом.

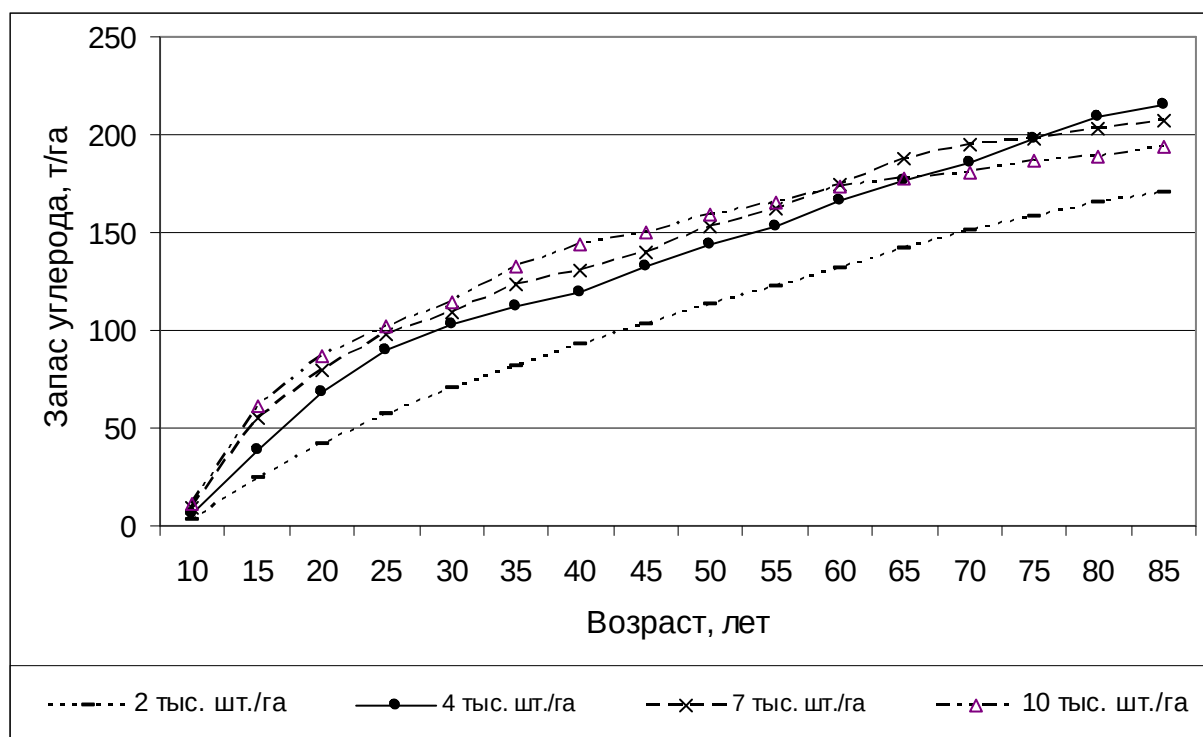


Рис. 6.9. Возрастная динамика накопления углерода в древостоях разной густоты посадки

Разница в запасах углерода между культурами с густотой посадки в 4 и 7 тыс. шт./га быстро уменьшается, и после 40 лет не превышает 5%, в

дальнейшем она еще больше нивелируется. Как отмечает ряд исследователей [349], запас насаждения зависит, прежде всего, от условий роста, а начальная плотность влияния на запас древесины к возрасту спелости практически не оказывает, что подтверждается и в отношении запасов углерода. Дрестостой с плотностью посадки 10 тыс. шт./га на начальных этапах роста отличаются максимальным из всех рассмотренных вариантов запасом и темпом накопления углерода. Их преимущество сохраняется до 50 – 60 лет, затем интенсивность накопления углерода падает и к 70 – 75 годам запас углерода в таких дрестостоях становится ниже по сравнению с менее густыми культурами (4 и 7 тыс. шт./га), разница между ними продолжает увеличиваться с возрастом. В данном случае загущенные насаждения в результате недостаточно эффективного естественного изреживания впадают в фазу депрессии, что снижает прирост не только отдельных деревьев, но и всего насаждения [350].

Запасы углерода в древесном детрите закономерно увеличиваются с ростом плотности посадки культур (рис. 6.10). Эта закономерность объясняется, повышением величины древесного отпада с увеличением плотности насаждения. Разница в запасах углерода в детрите между культурами с плотностью 2 и 10 тыс. шт./га составляет 40% – 60%.

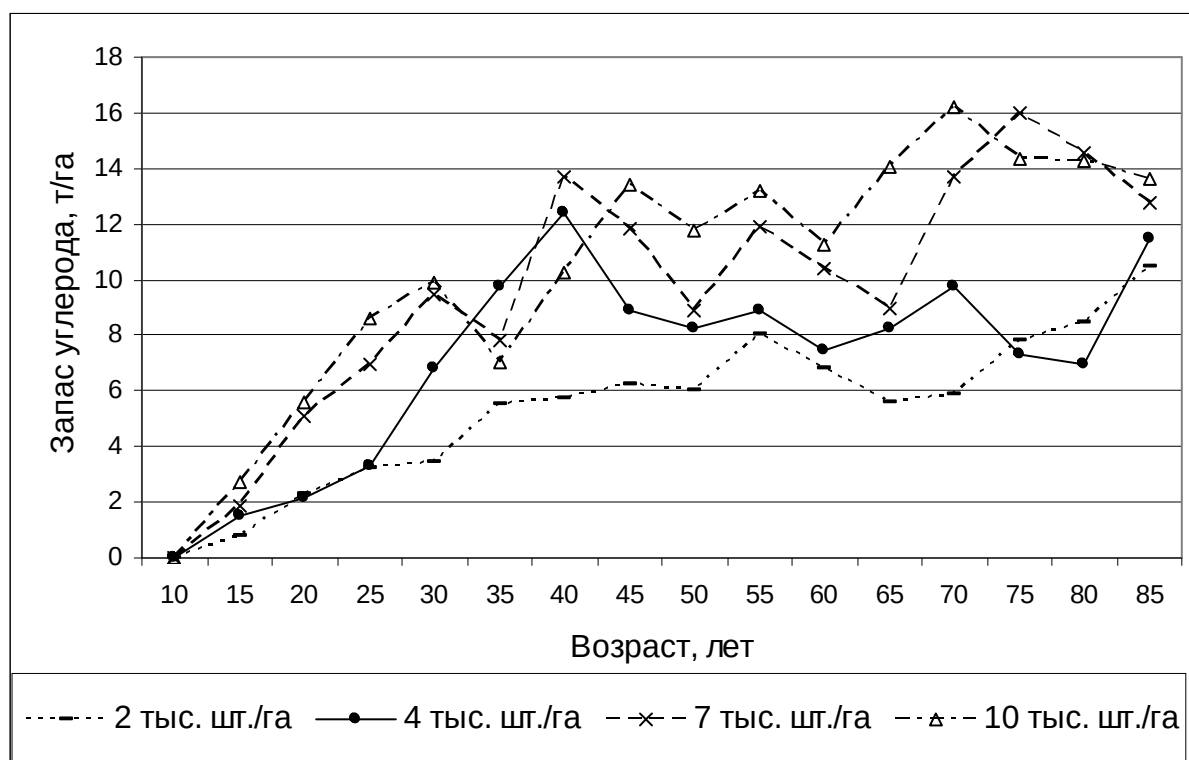


Рис. 6.10. Возрастная динамика запаса углерода в древесном детрите культур сосны различной плотности посадки

Сравнение запасов углерода в древостое на пробных площадях (см. табл. 4.6) и величин запасов полученных в результате моделирования показывает существенную разницу, усиливающуюся с возрастом. Модель прогнозирует запасы углерода, превышающие таковые на исследованных пробных площадях – к 60 годам разница достигает 17%, а к 80 годам – 32%. Это объясняется, прежде всего, последствиями проходных рубок, изымающими часть деревьев из насаждения. То есть, мы имеем дело с потенциальной и фактической продуктивностью, различие между которыми – результат взаимодействия существующей системы управления лесами с лесными экосистемами [353].

6.2.2. Динамика накопления углерода культурами сосны в зоне действия источников промышленного загрязнения окружающей среды

Результаты моделирования динамики накопления углерода древостоем и древесным детритом насаждений сосны I^a бонитета, произрастающими в разных зонах техногенного загрязнения (рис. 6.11) показывают падение запасов углерода в связи с повышением уровня техногенной нагрузки.

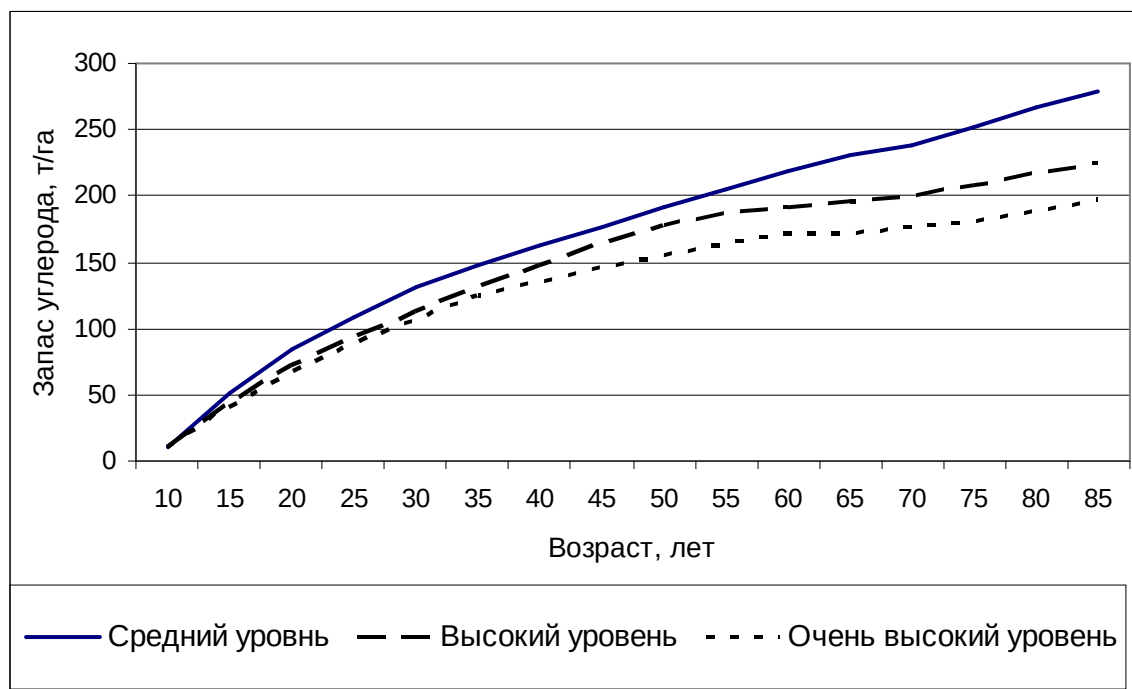


Рис. 6.11. Возрастная динамика накопления углерода в древостое и древесном детрите в зависимости от уровня техногенного загрязнения в сосновых насаждениях I^a бонитета.

Различия между насаждениями, произрастающими в разных зонах техногенного воздействия, усиливаются с возрастом: в 30 лет запас углерода в насаждениях произрастающих в зоне сильного и очень сильного уровней техногенного воздействия соответственно ниже на 17 и 23 т·га⁻¹ по сравнению с запасом в насаждениях со средним уровнем нагрузки; к 60 годам эта разница возрастает до 26 и 46 т·га⁻¹, а в 85 лет становится равной 55 и 81 т·га⁻¹.

Темпы расхождения в запасах углерода между насаждениями, произрастающими в различных зонах техногенного воздействия, значительно возрастают после 60 лет. С этого момента интенсивность накопления углерода насаждениями из зоны среднего уровня техногенного загрязнения снижается весьма незначительно, а в насаждениях, подверженных более сильной техногенной нагрузке, темпы накопления углерода в древостое и древесном детрите падают существенно.

Аналогичное явление наблюдается в накоплении углерода древостоем и древесным детритом сосняков I бонитета произрастающих в условиях техногенного загрязнения (рис. 6.12). В 30 лет по сравнению с культурами, произрастающими в условиях среднего уровня техногенной нагрузки, недобирается 15 и 23 т·га⁻¹, соответственно насаждениями в условиях высокого и очень высокого уровня техногенной нагрузки. В 60 лет разница увеличивается до 29 и 51 т·га⁻¹, а к 85 до – 53 и 81 т·га⁻¹. Различия в запасе углерода между насаждениями, произрастающими в различных условиях техногенного загрязнения, заметны практически с первых этапов развития, однако они усиливаются в возрасте 50 лет и более.

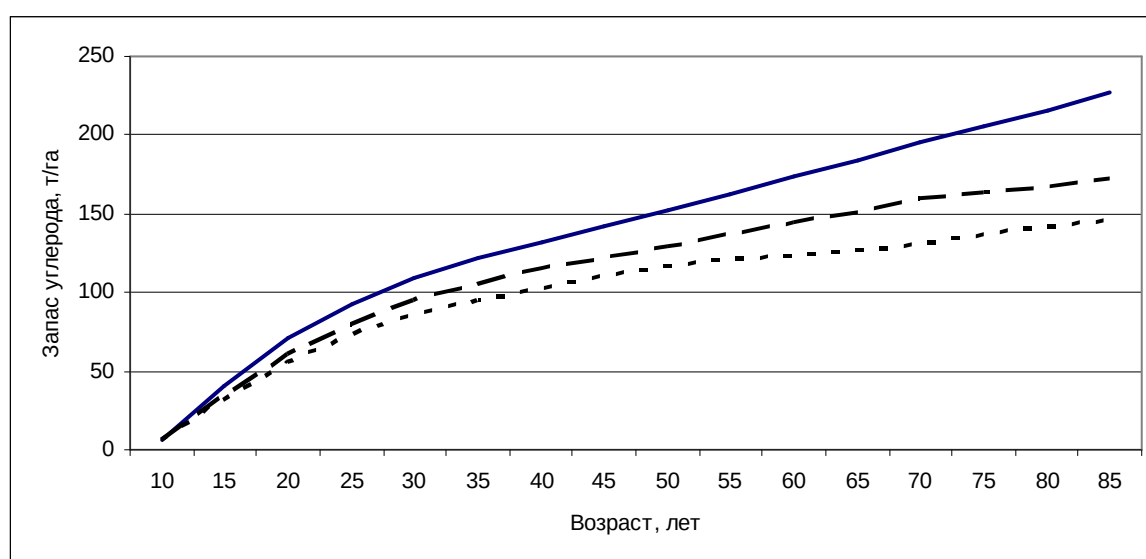


Рис. 6.12. Возрастная динамика накопления углерода в древостое и древесном детрите в зависимости от уровня техногенного загрязнения в сосновых насаждениях I бонитета.

Условные обозначения см. рис. 6.11.

Согласно результатам моделирования, накопление углерода в древостое и древесном детрите насаждениями II бонитета произрастающими в условиях сильной и очень сильной техногенной нагрузки соответственно ниже на 14 и 21 т·га⁻¹ по сравнению с насаждениями зоны среднего уровня техногенной нагрузки (рис. 6.13). В 50 лет эта разница составляет уже 17 и 31 т·га⁻¹, а в 85 – 20 и 34 т·га⁻¹. Таким образом, с возрастом различия между насаждениями, произрастающими в неидентичных условиях техногенного загрязнения, в суммарном запасе углерода усиливаются. Однако если проанализировать процент потерь запаса углерода, то он на всем протяжении развития насаждения остается практически одинаковым – около 17% и 23% в условиях сильной и очень сильной техногенной нагрузки, соответственно.

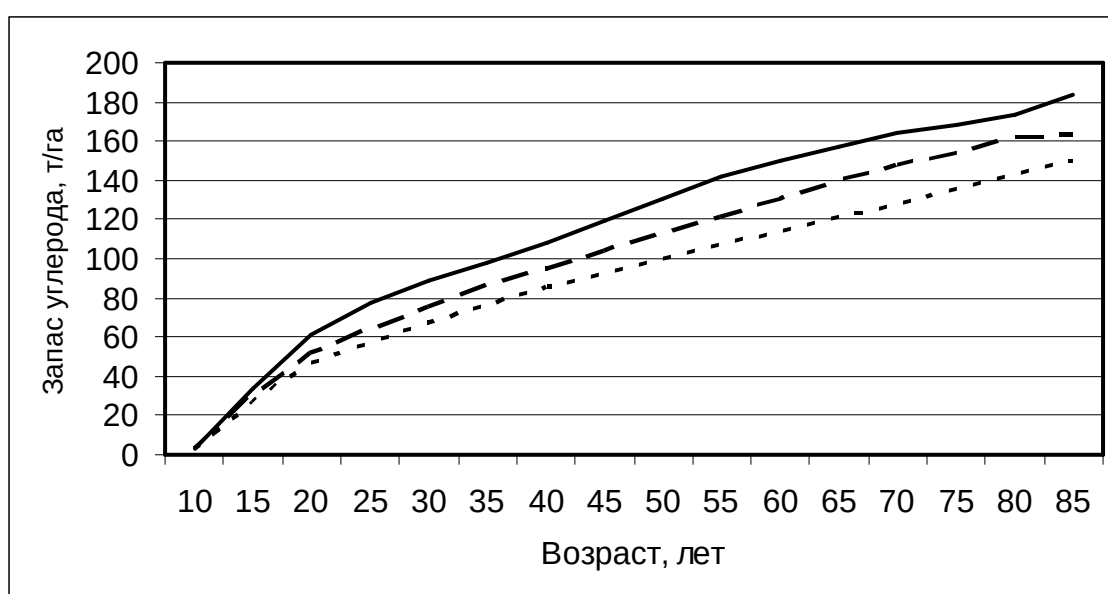


Рис. 6.13. Возрастная динамика накопления углерода в древостое и древесном детрите в зависимости от уровня техногенного загрязнения в сосновых насаждениях II бонитета.

Условные обозначения см. рис. 6.11.

Анализ перераспределения запасов углерода между фракциями древостоя и древесным детритом, вызванного техногенным загрязнением рассмотрен на примере насаждений I бонитета. Доля углерода, сосредоточенного в стволовой древесине насаждений произрастающих в условиях сильной техногенной нагрузки, до 40 летнего возраста, практически не отличается от таковой у насаждений из зоны среднего уровня техногенной нагрузки (рис. 6.14 и см. рис. 6.7). Однако после этого возраста начинаются расхождения в данном показателе, и к 80 годам доля углерода в стволовой древесине первых на 2% меньше, чем у вторых. Похожая картина наблюдается и в отношении углерода хвои. Правда, здесь ощутимая разница между насаждениями двух зон наступает несколько раньше. В 50 лет

доля углерода в хвое насаждений, произрастающих в зоне средней техногенной нагрузки, в 1,15 раз больше таковой в условиях высокого уровня техногенной нагрузки, а в 80-летнем возрасте в 1,26 раз. В описываемом случае усиления техногенной нагрузки значительно увеличивается доля углерода, сосредоточенного в древесном детрите. В среднем за моделируемый период развития насаждений (10 – 85 лет) в сосняках из зоны среднего уровня техногенной нагрузки она составляет 4,8%, от общего запаса углерода, а в сосняках из зоны высокого уровня техногенной нагрузки – 6,1%. Это объясняется усилением отпада в условиях техногенного загрязнения.

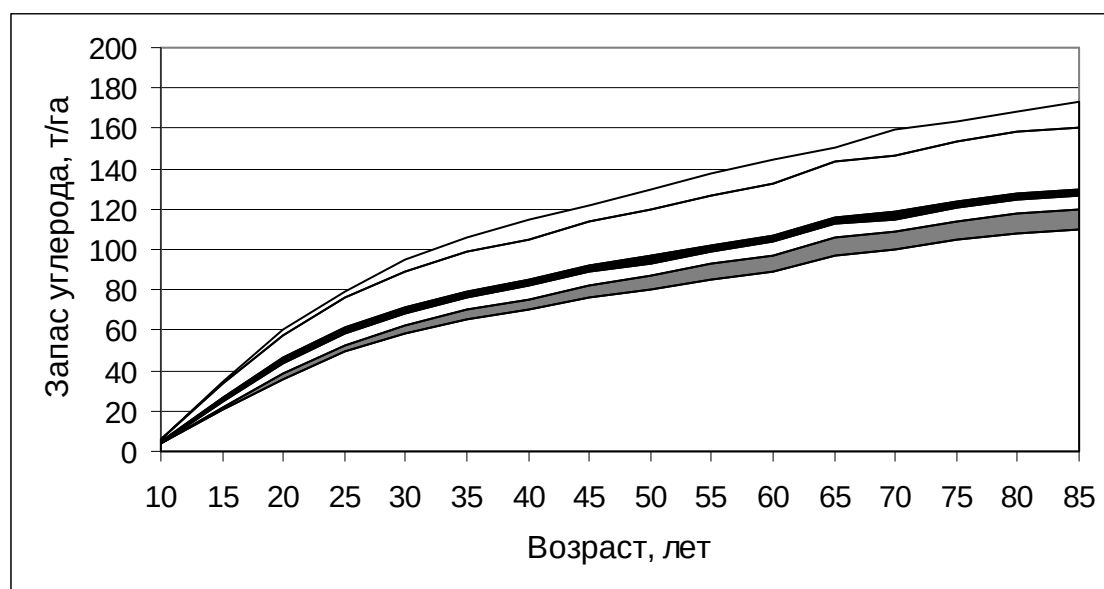


Рис. 6.14. Возрастная динамика накопления углерода сосновыми культурами I бонитета, произрастающими в зоне сильного уровня техногенной нагрузки.

Условные обозначения см. рис. 6.6.

Еще больше усиливаются описанные выше закономерности при рассмотрении распределения запаса углерода в насаждениях, произрастающих в условиях очень сильной техногенной нагрузки (рис. 6.15). Разница между долей стволовой древесины в аккумуляции углерода насаждениями из зоны среднего уровня техногенной нагрузки и насаждениями из зоны очень высокого уровня техногенной нагрузки становится хорошо заметной к 30 годам, и составляет 1,5%. Максимального уровня различия достигают в 45 – 60 лет (около 3%), а затем постепенно снижаются, и в 80 лет равняются 2%. Дефолиация, вызванная воздействием аэрополлютантов, в зоне очень сильной техногенной нагрузки приводит к значительному снижению массы углерода, накопленного в фитомассе хвои. Разница с насаждениями, произрастающими в условиях средней техногенной нагрузки, в 50 лет составляет $0,8 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, а в 80 – $1,2 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Если рассмотреть долю

хвой в общем запасе углерода, то различия примерно соответствуют таковым между зонами среднего и высокого уровня техногенной нагрузки. Различия в доле углерода сосредоточенной в древесном детрите составляют в среднем за период моделирования 1,8%, в пользу насаждений, подверженных очень сильному уровню техногенной нагрузки.

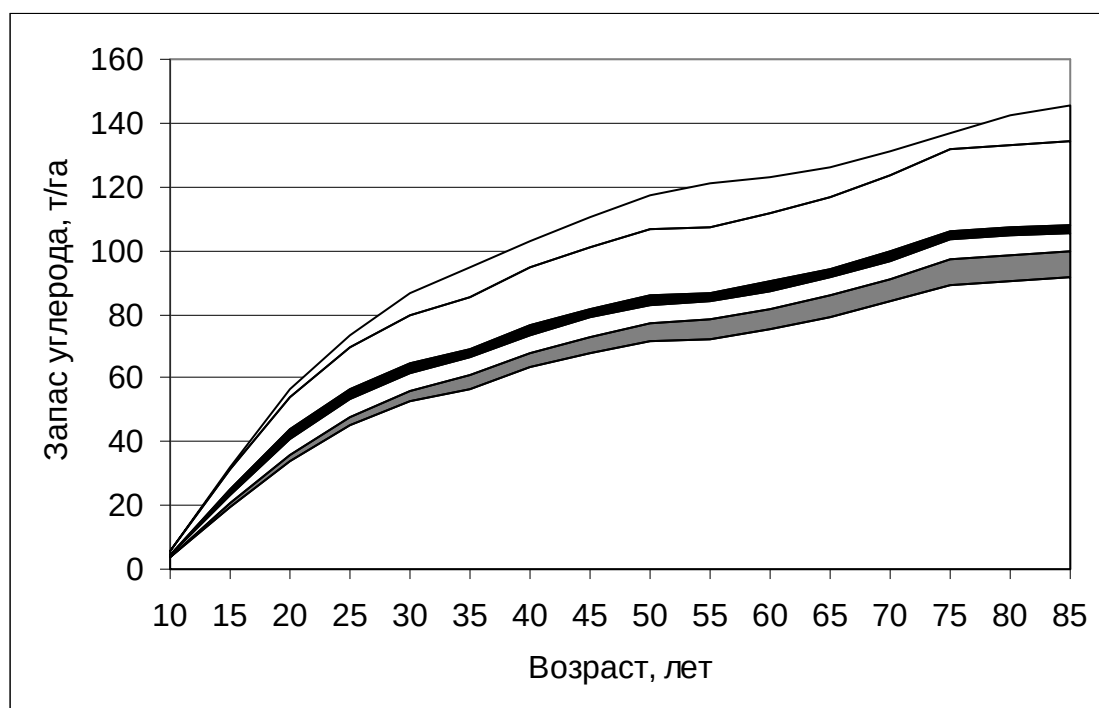


Рис. 6.15. Возрастная динамика накопления углерода сосновыми культурценозами I бонитета, произрастающими в зоне очень сильного уровня техногенной нагрузки.

Условные обозначения см. рис. 6.6.

Таким образом, явление снижения запасов стволовой древесины и фитомассы в насаждениях, подверженных техногенному загрязнению [354], является причиной уменьшения запаса углерода в древостое и древесном детрите сосняков, произрастающих в условиях сильной и очень сильной техногенной нагрузки на 15% и 23%, соответственно. Отличия в запасе углерода и темпах его накопления в насаждениях, находящихся в условиях с различной техногенной нагрузкой, сильно возрастают после 50 – 60 лет.

Техногенное загрязнение вызывает не только снижение суммарного запаса углерода [355, 356], но и его перераспределение между отдельными фракциями. Ухудшение санитарного состояния насаждений под воздействием загрязнения окружающей среды [288] приводит к усилению темпов отмирания деревьев, что является причиной увеличения доли углерода, приходящейся на древесный детрит. В насаждениях, произрастающих в условиях сильного уровня техногенной нагрузки, его доля увеличивается

на 1,3%, а в условиях очень сильной техногенной нагрузки на 1,8% при доле детрита в условиях среднего уровня техногенного загрязнения равной 4,8%. Доля же углерода в стволовой древесине и хвое, напротив, падает.

6.2.3. Моделирование воздействия рубок промежуточного пользования на возрастную динамику накопления углерода древостоем и детритом

Рубки промежуточного пользования – основной способ воздействия человека на продукционные процессы, протекающие в лесных экосистемах. Поэтому является крайне необходимым оценить их роль в накоплении углерода лесными насаждениями. Входными параметрами модели явились: густота посадки 4 – 10 тыс. шт./га, I бонитет. Рассмотрено воздействие рубок трех уровней повторяемости и трех степеней интенсивности изреживания (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Программы рубок промежуточного пользования, использованные в моделировании

Повторяемость	Интенсивность изреживания	Над чертой – возраст проведения рубки, лет; под чертой – процент выборки, %						
Редкая	Слабая	<u>25</u> 10	<u>40</u> 10	<u>60</u> 10				
	Умеренная	<u>25</u> 20	<u>40</u> 20	<u>60</u> 20				
	Сильная	<u>25</u> 30	<u>40</u> 30	<u>60</u> 30				
Средняя	Слабая	<u>20</u> 10	<u>30</u> 10	<u>40</u> 10	<u>50</u> 10	<u>65</u> 10		
	Умеренная	<u>20</u> 20	<u>30</u> 20	<u>40</u> 20	<u>50</u> 20	<u>65</u> 20		
	Сильная	<u>20</u> 30	<u>30</u> 30	<u>40</u> 30	<u>50</u> 30	<u>65</u> 30		
Частая	Слабая	<u>20</u> 10	<u>25</u> 10	<u>30</u> 10	<u>35</u> 10	<u>40</u> 10	<u>50</u> 10	<u>60</u> 10
	Умеренная	<u>20</u> 20	<u>25</u> 20	<u>30</u> 20	<u>35</u> 20	<u>40</u> 20	<u>50</u> 20	<u>60</u> 20
	Сильная	<u>20</u> 30	<u>25</u> 30	<u>30</u> 30	<u>35</u> 30	<u>40</u> 30	<u>50</u> 30	<u>60</u> 30

Из результатов моделирования воздействия рубок редкой повторяемости различной интенсивности изреживания на накопление углерода в древесном, древесном детрите и вырубленной древесине насаждениями с густотой посадки 4 тыс. шт./га (рис. 6.16.) следует, что культуры с низкой густотой посадки оказываются достаточно чувствительными даже к слабой степени изъятия древесины из насаждения. Во всех случаях, после начала рубок запас углерода в насаждении заметно падает. Величина падения зависит от степени интенсивности изреживания. Необходимо отметить, что прореживания слабой степени интенсивности (10%) ненамного снижают запасы углерода (не более чем на 10%), при этом темпы его накопления практически не падают. Однако, проходная рубка той же степени интенсивности оказывает существенное влияние на баланс углерода в насаждении. В итоге после проведения редких рубок слабой интенсивности изреживания к 80 годам запас углерода в насаждении на 35% ниже по сравнению с контролем.

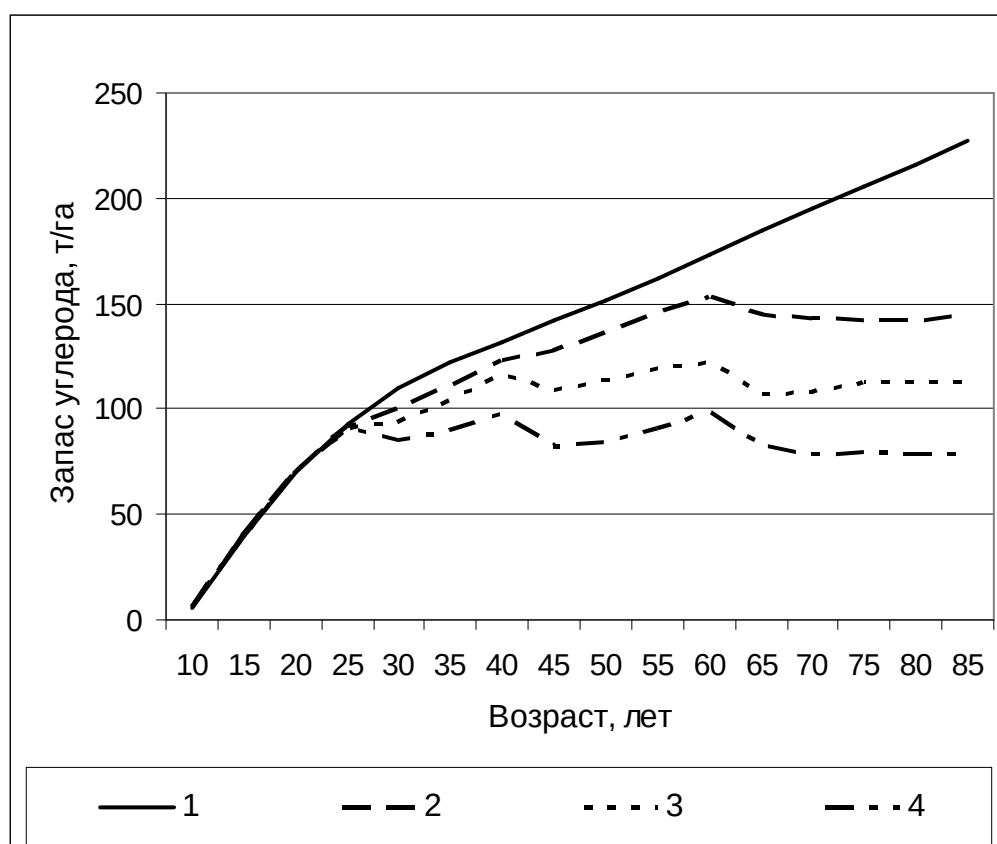


Рис. 6.16. Возрастная динамика накопления углерода сосновыми насаждениями при редкой повторяемости рубок в зависимости от степени изреживания (густота посадки 4 тыс. шт./га).

1 — без рубок; 2 — слабая степень изреживания; 3 — умеренная степень изреживания; 4 — сильная степень изреживания.

К моменту второго прореживания, при умеренной степени выборки, практически достигается запас углерода, характерный для тех насаждений, в которых проведена рубка слабой степени изреживания. После второго прореживания запас углерода в насаждении уже не восстанавливается, и к 60 годам составляет 70% от контроля, а к 80 – 51%.

Применение редких рубок сильной степени изреживания приводит к тому, что запас углерода в насаждении после начала их применения остается практически на одном и том же уровне, и колеблется возле значения $90 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$.

Более сильное влияние на накопление углерода в древостое, древесном детрите и вырубленной древесине оказывают рубки средней периодичности (рис. 6.17). Даже при слабой степени интенсивности рубок запас углерода в насаждении сильно отстает от контроля; в 50 лет разница составляет 25%, а в 80 – 49%. Умеренная степень изреживания приводит к тому, что запас углерода не превышает $100 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. А при выборке по запасу 30% в каждый прием запас углерода начинает снижаться после 30 лет, и к 80 годам не превышает $30 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$.

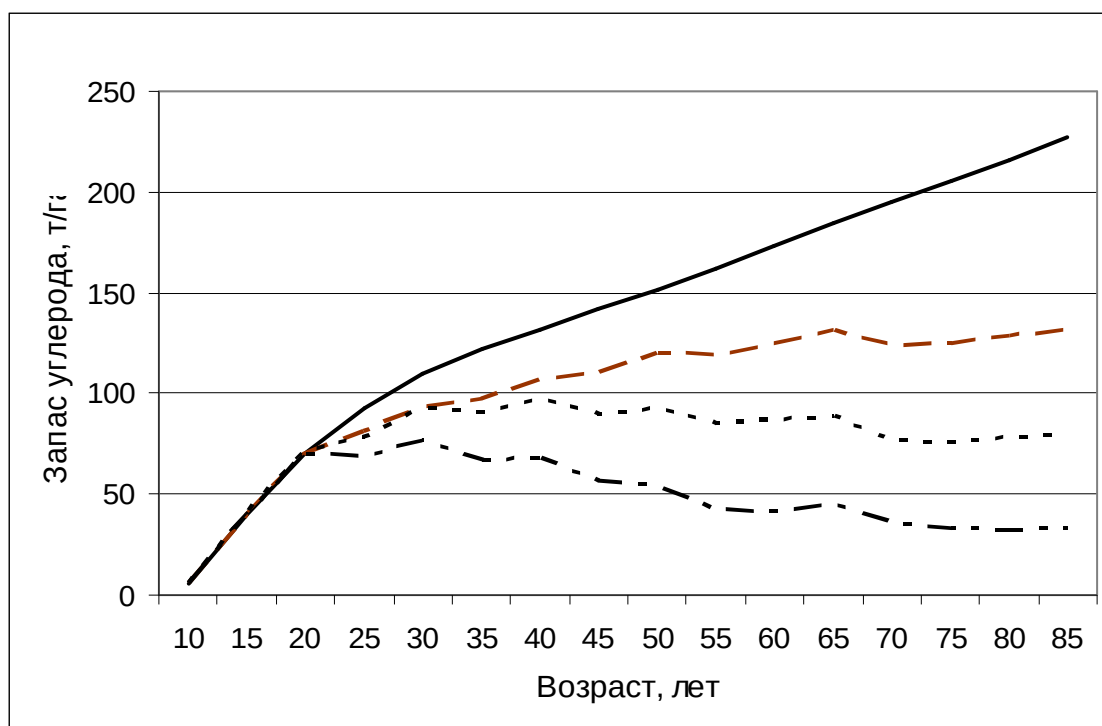


Рис. 6.17. Возрастная динамика накопления углерода сосновыми насаждениями при рубках средней повторяемости в зависимости от степени изреживания (густота посадки 4 тыс. шт./га).

Условные обозначения см. рис. 6.16.

Рубки частой повторяемости даже при слабой степени интенсивности изреживания не позволяют запасу углерода в древостое, древесном детрите и вырубленной древесине подняться выше $100 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ (рис. 6.18). При более высоком уровне вмешательства вскоре после 25 лет запас углерода снижается, не достигнув и $80 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. К 80 годам его величина не превышает $50 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ при умеренной степени интенсивности выборки и $20 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ при сильной интенсивности.

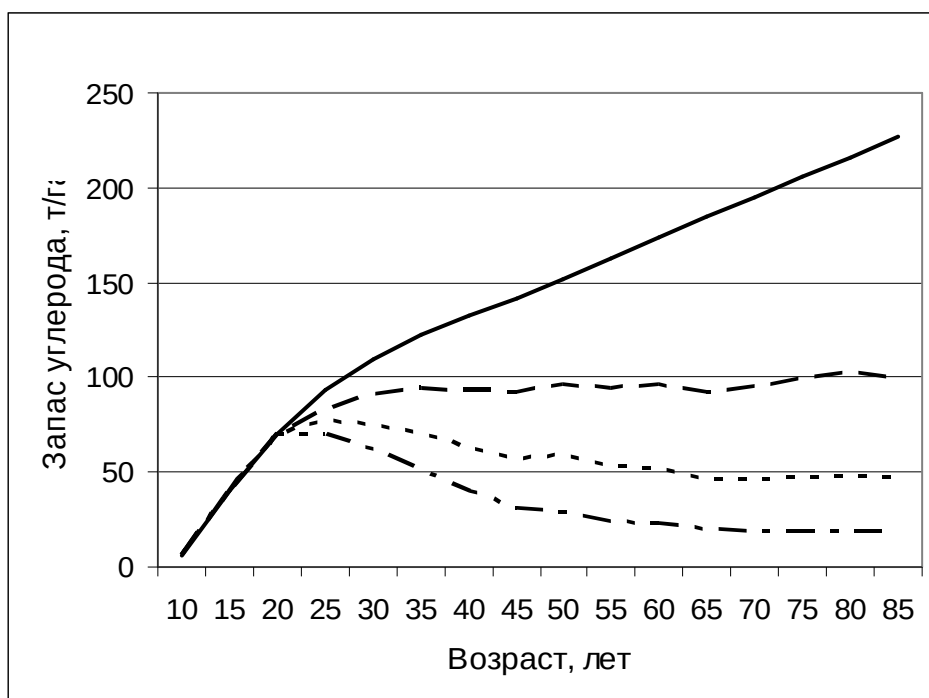


Рис. 6.18. Возрастная динамика накопления углерода сосновыми насаждениями при рубках с частой повторяемостью в зависимости от степени изреживания (густота посадки 4 тыс. шт./га). Условные обозначения см. рис. 6.16.

Таким образом, культуры с начальной густотой 4 тыс. шт./га оказываются очень чувствительными к изъятию древесины в процессе промежуточного пользования. Даже рубки редкой повторяемости слабой степени интенсивности изреживания к возрасту 80 лет приводят к потере 35% углерода по сравнению с ненарушенными насаждениями. Менее чувствителен суммарный запас углерода к слабым прореживаниям, а проходные рубки оказывают на него сильное отрицательное воздействие.

Результаты моделирования воздействия рубок редкой повторяемости на насаждения с густотой посадки 7 тыс. шт./га (рис. 6.19) позволяют сделать вывод о том, что рубки слабой степени изреживания оказывают незначительное влияние на запас углерода в насаждении, и к моменту следу-

ющей рубки он почти восстанавливается до значения характерного для контроля (разница составляет 6% – 7%).

Повышение интенсивности рубки промежуточного пользования оказывает более существенное воздействие на запас углерода в древостое, древесном детрите и вырубленной древесине. При умеренной интенсивности изреживания он останавливается на отметке около $140 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, а при сильной интенсивности изреживания на $110 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Эта масса набирается в первом случае в начале третьего класса возраста, а во втором сразу после начала рубок промежуточного пользования.

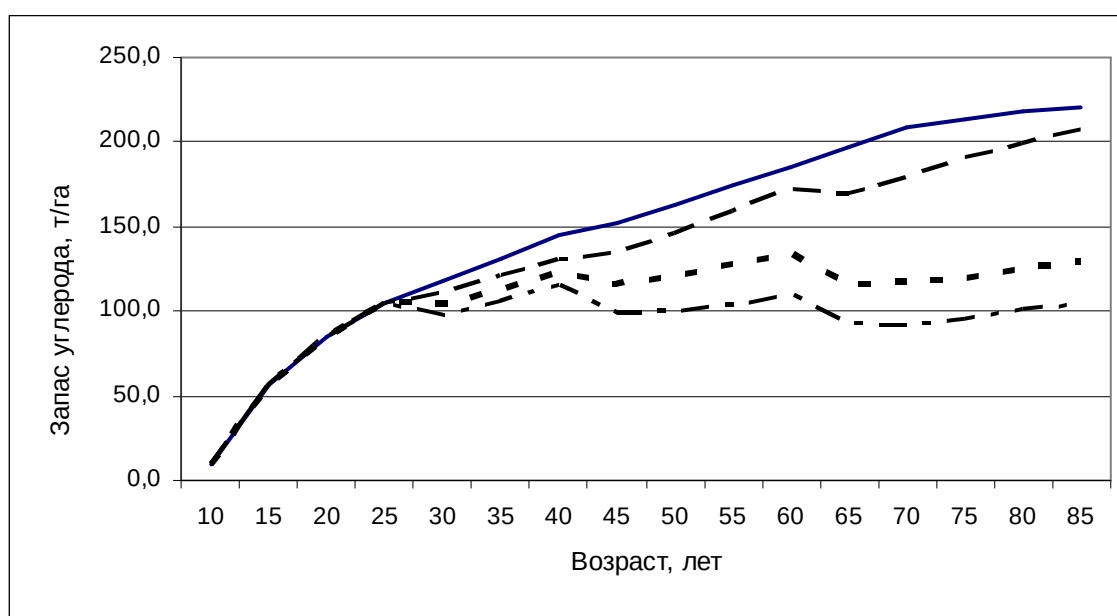


Рис. 6.19. Возрастная динамика накопления углерода сосновыми насаждениями при редкой повторяемости рубок в зависимости от степени изреживания (густота посадки 7 тыс. шт./га).

Условные обозначения см. рис. 6.16.

Рубки слабой интенсивности изреживания и средней повторяемости сильно замедляют темпы накопления углерода в насаждении. В результате с возрастом он все сильнее отстает от контроля (рис. 6.20), в 80 лет разница составляет $60 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$.

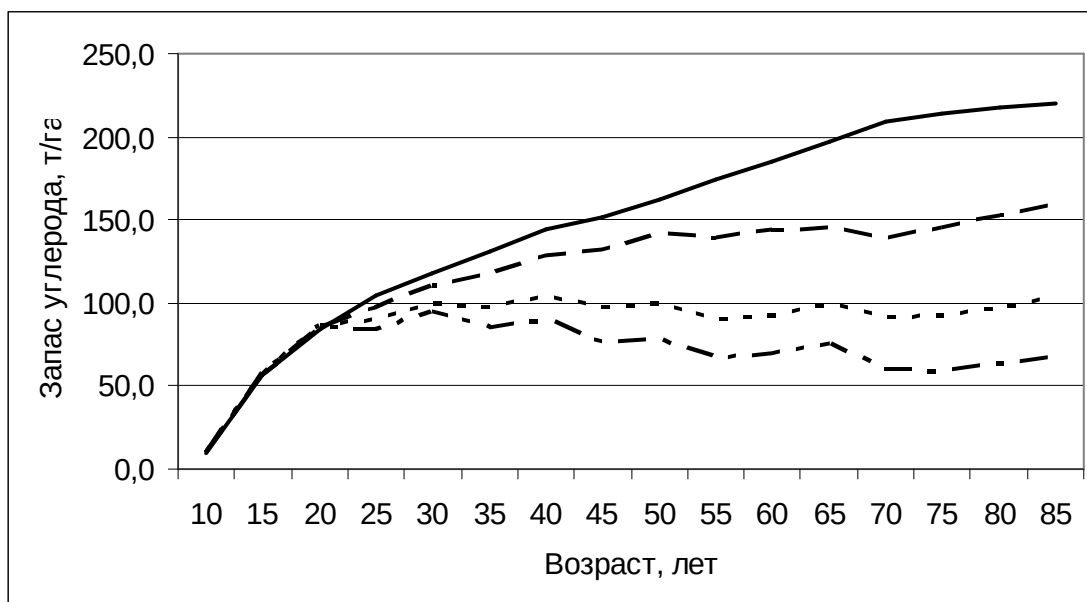


Рис. 6.20. Возрастная динамика накопления углерода сосновыми насаждениями при рубках средней повторяемости в зависимости от степени изреживания (густота посадки 7 тыс. шт./га).

Условные обозначения см. рис. 6.16.

При рубках умеренной степени изреживания средней повторяемости прирост запаса углерода останавливается на значении $100 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ в 30 лет и не поднимается выше до конца срока моделирования. При рубках сильной степени изреживания суммарный запас углерода в рассматриваемых компонентах волнообразно снижается после 30 лет, не достигнув и $100 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$.

В результате проведения рубок с частой повторяемостью запас углерода в древостое, древесном детрите и вырубленной древесине со второго класса возраста снижается в результате умеренной и сильной степени выборки (рис. 6.21). В последнем варианте снижение такое сильное, что к 80 годам запас углерода не превышает $15 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. При умеренной степени изреживания запас углерода в 65 – 70 лет стабилизируется, и даже несколько возрастает, не опустившись ниже $50 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. При слабой степени интенсивности изреживания запас углерода в насаждении увеличивается, но весьма медленными темпами, и в 80 лет разница с контролем составляет $90 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, что в полтора раза больше по сравнению с вариантом с рубками средней повторяемости.

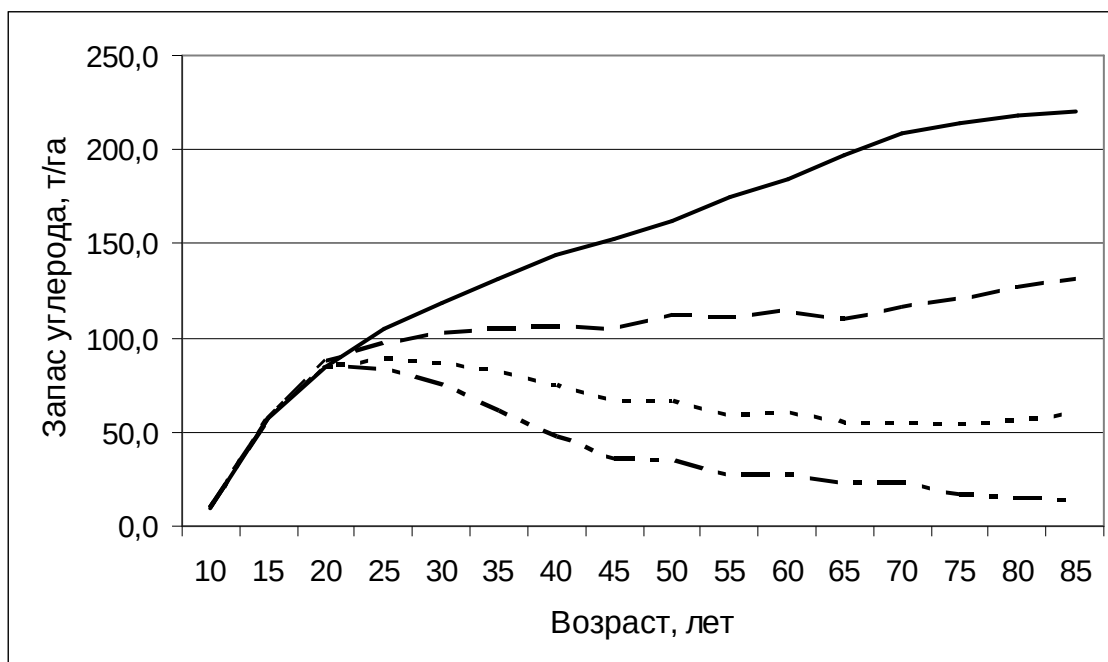


Рис. 6.21. Возрастная динамика накопления углерода сосновыми насаждениями при рубках частой повторяемости в зависимости от степени изреживания (густота посадки 7 тыс. шт./га).
Условные обозначения см. рис. 6.16.

Таким образом, для насаждений с густотой посадки 7 тыс. шт./га выявлены тенденции в падении запаса углерода аналогичные более редким культурам. Однако они менее выражены, и в большинстве случаев (особенно при слабой интенсивности изреживания) насаждения приходят к возрасту спелости с бóльшим запасом углерода. Даже при частой повторяемости рубок слабая степень изреживания древостоя позволяет ему практически на всем протяжении развития оставаться, хоть и слабым, но стоком углерода.

Еще менее чувствительным к рубкам промежуточного пользования оказался запас углерода в насаждениях с густотой посадки 10 тыс. шт./га. Высокая начальная густота позволяет им компенсировать изъятие углерода с древесиной улучшением роста оставшихся деревьев. Очень слабое воздействие на накопление углерода оказывают редко повторяющиеся рубки слабой степени изреживания (рис. 6.22). В таких условиях запас углерода в древостое, древесном детрите и вырубленной древесине практически восстанавливается (приближается к контрольным значениям) к моменту проведения следующей рубки и к возрасту спелости.

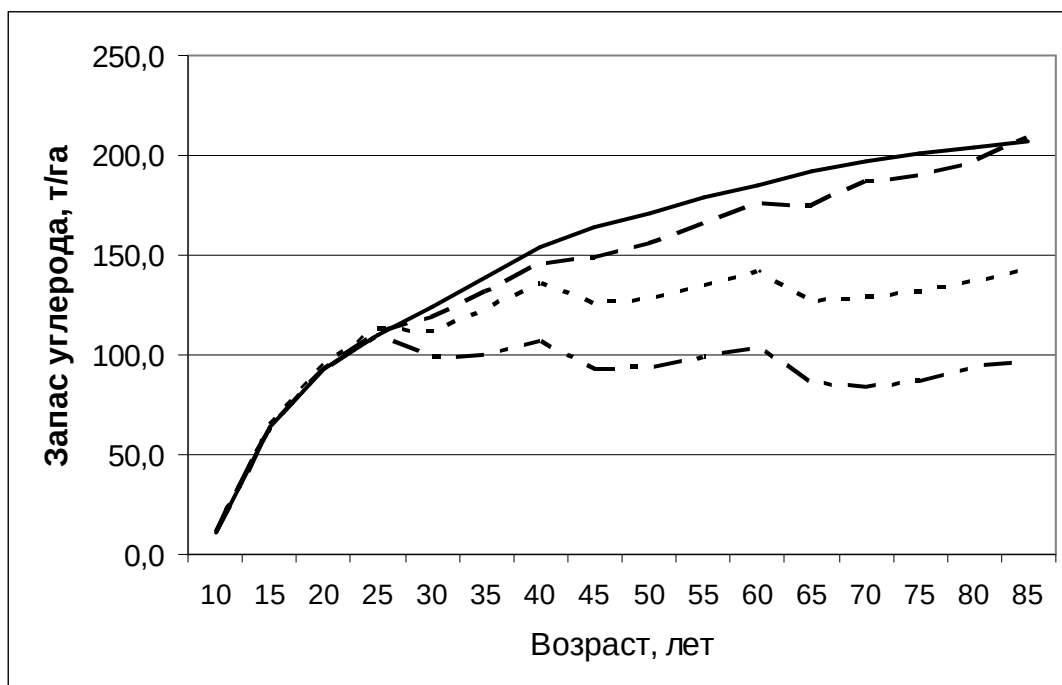


Рис. 6.22. Возрастная динамика накопления углерода сосновыми насаждениями при редкой повторяемости рубок в зависимости от степени изреживания (густота посадки 10 тыс. шт./га).

Условные обозначения см. рис. 6.16.

Рубки умеренной и сильной степени изреживания, начиная с третьего класса возраста, вызывают волнообразные изменения запаса углерода. В первом случае он колеблется возле значения в $140 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, а во втором около $100 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, с амплитудой приблизительно равной $15 - 20 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Таким образом, даже высокая начальная густота и редкая повторяемость рубок, при умеренной и сильной степени изреживания, не могут благоприятствовать продолжению сколько-нибудь значительного накопления углерода насаждением, после перехода его в средневозрастную стадию развития.

Рубки умеренной и сильной степени изреживания при средней повторяемости в насаждении с густотой посадки 10 тыс. шт./га. (рис. 6.23) приводят к тому, что, начиная с третьего класса возраста, запас углерода в насаждении начинает медленно снижаться, достигнув в первом случае $117 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, а во втором $97 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. К 80 годам в них остается 104 и $56 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, соответственно. Прореживания слабой интенсивности выборки оказывают незначительное воздействие на суммарный запас углерода в насаждении, разница с контролем не превышает 10%. С переходом в третий класс возраста эта разница увеличивается до 20% и остается такой до конца срока моделирования.

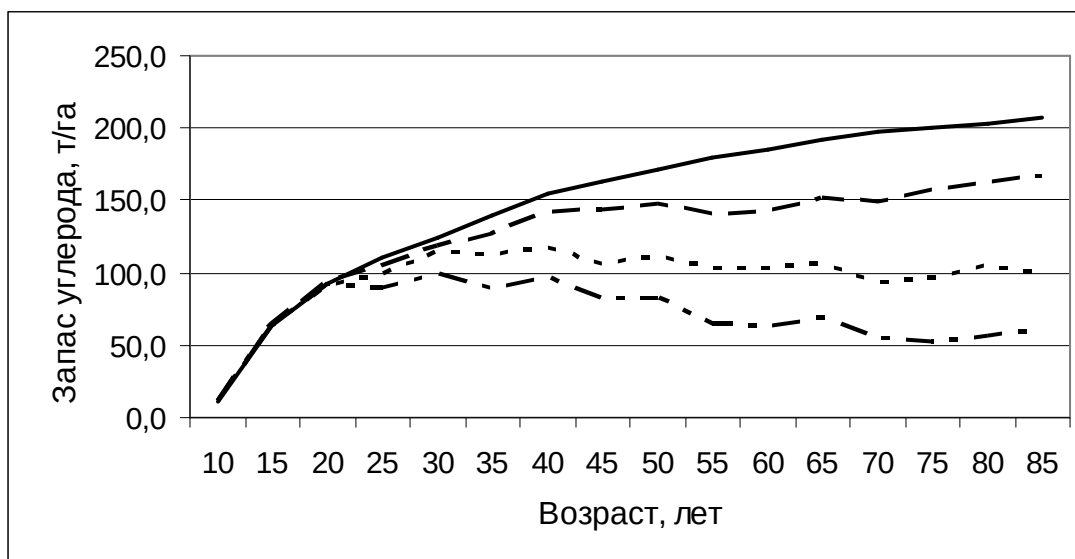


Рис. 6.23. Возрастная динамика накопления углерода сосновыми насаждениями при рубках средней повторяемости в зависимости от степени изреживания (густота посадки 10 тыс. шт./га).
Условные обозначения см. рис. 6.16.

Рубки с частой повторяемостью всех рассматриваемых уровней степени изреживания оказывают сильное воздействие на углероддепонирующую функцию насаждения (рис. 6.24). При слабой, умеренной и сильной степени изреживания максимальный запас углерода в древостое, древесном детрите и вырубленной древесине не поднимается выше 130, 98 и 90 $\text{т} \cdot \text{га}^{-1}$, соответственно.

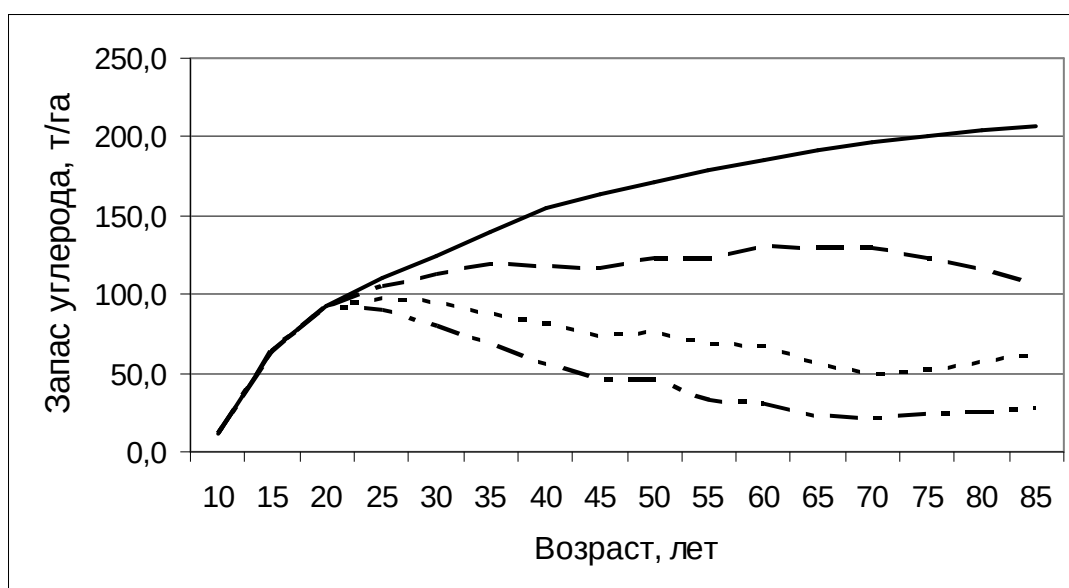


Рис. 6.24. Возрастная динамика накопления углерода сосновыми насаждениями при рубках частой повторяемости в зависимости от степени изреживания (густота посадки 10 тыс. шт./га).
Условные обозначения см. рис. 6.16.

Выяснение характера перераспределения запасов углерода между компонентами насаждения в результате промежуточного пользования проведено на примере проведения рубок средней повторяемости умеренной степени изреживания, при густоте посадки 7 тыс. шт./га.

На протяжении развития насаждения стволовая древесина составляет 57% – 67% от общего запаса углерода, при этом не выявлено какой-либо закономерности в изменении этого показателя с возрастом, начиная с 20 лет (рис. 6.25). В отсутствии рубок доля запаса углерода в древесине не опускается ниже 60%, и в среднем составляет 62%. Крона в обоих случаях составляет около 8% запаса углерода, и это значение уменьшается от 13% в 15 лет, до 5% в 85.

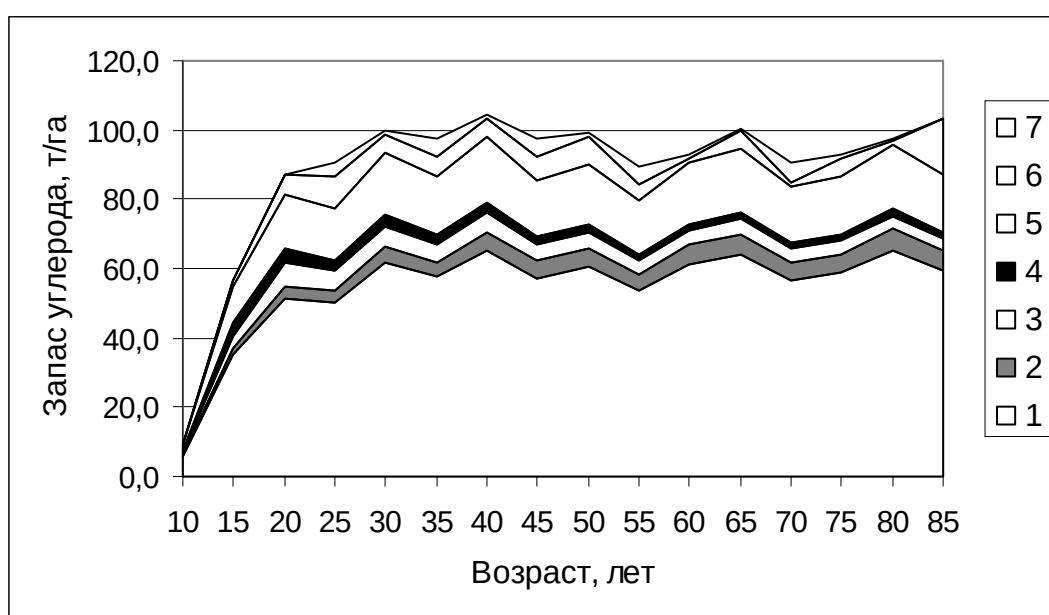


Рис. 6.25. Возрастные изменения распределения запасов углерода в сосновом насаждении, подвергающемся рубкам умеренной степени изреживания средней повторяемости при густоте посадки 7 тыс. шт./га.

1 — древесина ствола; 2 — кора ствола; 3 — ветки; 4 — хвоя; 5 — корни; 6 — древесный детрит; 7 — углерод в вырубленной древесине.

При регулярных рубках, на древесный детрит приходится гораздо меньшая доля углерода, по сравнению с контролем (5% против 7%). Еще более ощутима эта разница, если рассмотреть абсолютные значения массы углерода запасенной в детрите, на контроле она составляет в среднем $9,6 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, а в случае рубок — $2,3 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Запас углерода в вырубленной древесине изменяется волнообразно, имея максимум сразу, после проведения рубок, и снижаясь практически до нуля ко времени проведения следующей. Максимально его доля составляет около 6% общего запаса.

Таким образом, рубки промежуточного пользования отражаются существенным образом, как на величине общего запаса углерода в насаждении, так и на его распределении между отдельными компонентами. Наиболее щадящими к запасу углерода оказываются рубки слабой интенсивности изреживания, особенно при их редкой повторяемости. Как показали результаты моделирования, после проведения прореживаний слабой интенсивности запас углерода в насаждении может практически восстановиться.

В подавляющем большинстве случаев проходные рубки не оставляют шанса достигнуть близкого к контролю запаса углерода. Увеличение начальной густоты насаждения делает его более устойчивым, с позиций углеродного баланса, к промежуточному пользованию. В результате изъятия части деревьев падает доля углерода, приходящаяся на стволовую древесину и древесный детрит. При проведении рубок промежуточного пользования доленое участие кроны в депонировании углерода остается практически неизменным.

6.2.4. Прогноз изменения запасов углерода в сосновом культурфитоценозе при различных климатических параметрах и газовом составе атмосферы

Леса являются не только инструментом, который можно применить для преодоления парникового эффекта, но и сами подвергаются воздействию со стороны изменений газового состава атмосферы, в частности, содержания в нем углекислого газа, и климатических условий. Поэтому является целесообразным сделать прогноз изменения углероддепонирующей функции сосновых древостоев искусственного происхождения в ответ на глобальную трансформацию условий окружающей среды.

Воспользовавшись прогнозными моделями глобальных изменений окружающей среды [351, 352] мы выделили три вероятных сценария постепенного изменения содержания углекислого газа в атмосфере и вызванного этим повышения температуры поверхности земли:

- 1) К 2100 г. содержание углекислого газа в атмосфере будет равняться 550 ppm, что вызовет повышение температуры на 2 °С;
- 2) К 2100 г. содержание углекислого газа в атмосфере будет равняться 700 ppm, что вызовет повышение температуры на 3 °С;

- 3) К 2100 г. содержание углекислого газа в атмосфере будет равняться 850 ppm, что вызовет повышение температуры на 4 °С.

В соответствии с описанными выше прогнозами, мы и моделировали реакцию динамики накопления углерода лесными насаждениями на глобальные изменения окружающей среды (содержание углекислого газа в атмосфере и температуру поверхности). Начальными параметрами модели явились: сосняки I бонитета, густота посадки 4 тыс. шт./га, без промежуточного пользования, уровень комплексной техногенной нагрузки – средний.

Во всех рассматриваемых сценариях развития глобальных изменений роль сосняков искусственного происхождения, произрастающих в регионе исследований в фиксации атмосферной углекислоты должна усилиться (рис. 6.26). Существенные различия проявляются через 30 – 35 лет от начальной точки моделирования. К 50 годам различия между контролем и 1, 2 и 3 сценариями становятся равными 11%, 25% и 31% соответственно. К 80 годам эта разница усиливается до 16%, 35% и 57%. Средняя скорость накопления углерода для контроля, 1-го, 2-го и 3-го сценариев равна 2,9, 3,2, 3,6 и 3,8 т·га⁻¹год⁻¹, соответственно, т.е. ее повышение относительно контроля составляет для соответствующих сценариев 10%, 20% и 24%.

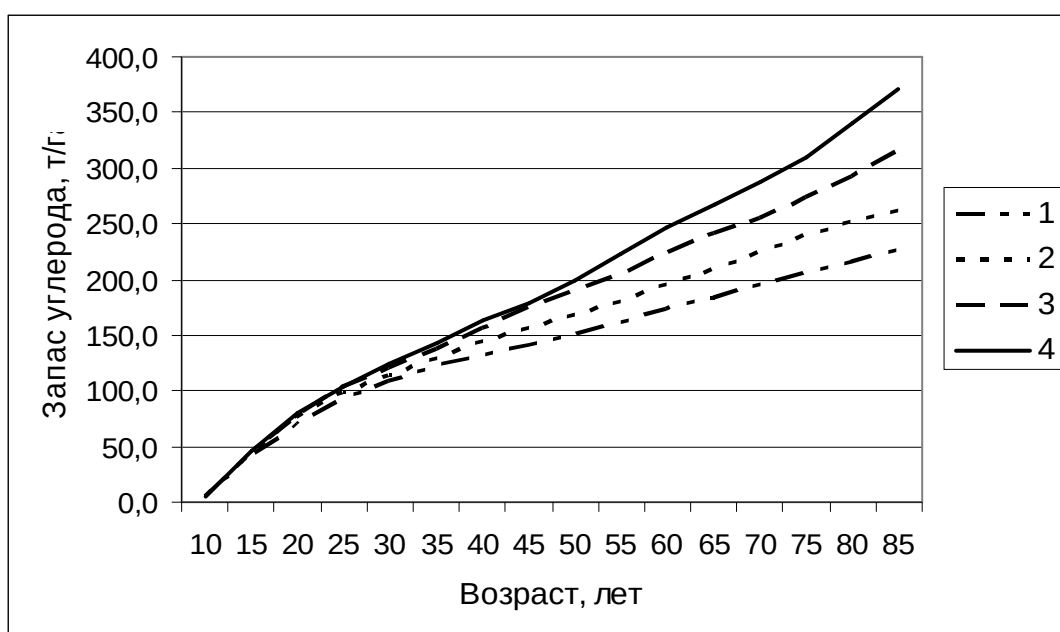


Рис. 6.26. Возрастная динамика поглощения углерода сосновым древостоем и древесным детритом при различных сценариях изменения условий окружающей среды.

1 – без изменений; 2 – сценарий № 1; 3 – сценарий № 2; 4 – сценарий № 3.

Чтобы выявить, перераспределяется ли запас углерода между различными фракциями при рассматриваемых трансформациях условий окружающей среды, нами проведено сравнение динамики накопления углерода в контроле (см. рис. 6.7) и в сценарии № 2 (рис. 6.27). Сравнение обоих графиков не позволило выявить сколько-нибудь существенных различий, что говорит о том, что при возрастании общих запасов углерода в древостое, пропорции различных фракций в запасе остаются постоянными.

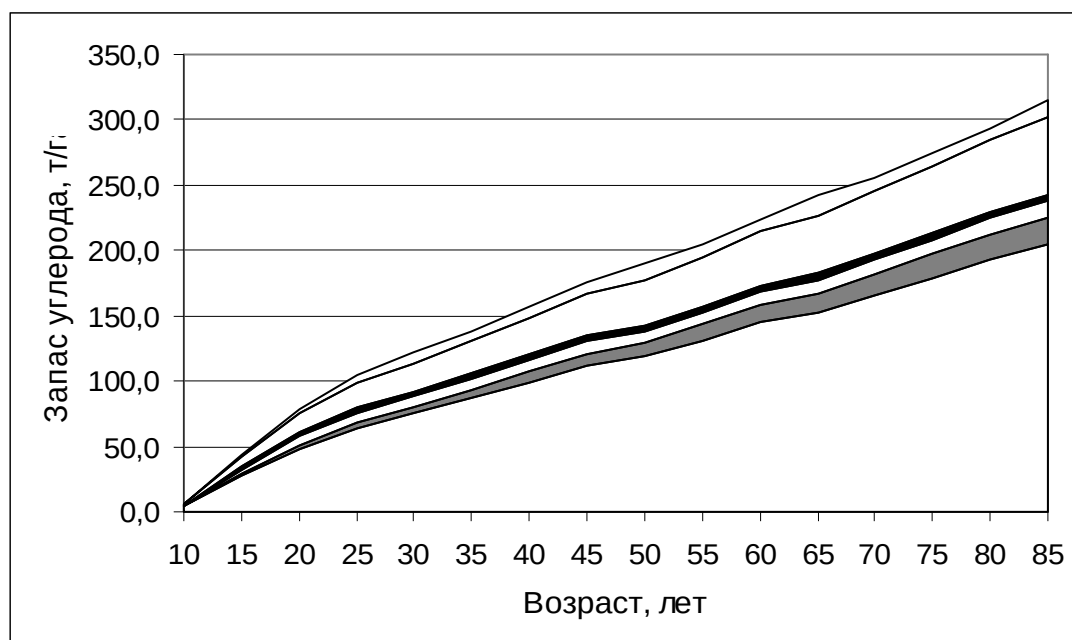


Рис. 6.27. Возрастная динамика распределения запасов углерода между отдельными фракциями древостоя и древесным детритом при сценарии № 2 изменения условий окружающей среды.

Условные обозначения см. рис. 6.6.

Определенный интерес представляет совместное воздействие глобального изменения окружающей среды и промежуточного пользования на динамику накопления углерода насаждением. Нами проведено моделирование воздействия рубок средней повторяемости умеренной интенсивности изреживания и изменения условий окружающей среды по 2-му сценарию на накопление углерода.

Рост содержания углекислого газа в атмосфере и повышение температуры не вносит кардинальных корректив в углероддепонирующую функцию лесных насаждений под влиянием промежуточного пользования (рис. 6.28). Хотя общий запас углерода в таком насаждении несколько выше по сравнению с насаждениями, подвергающимися промежуточному пользованию в неизменных условиях окружающей среды. Между тем его доля от ненарушенных насаждений, в условиях изменения климата и га-

зового состава атмосферы составляет в среднем за моделируемый отрезок времени 67%. Такое же сравнение, но при неизменных глобальных условиях окружающей среды, дает величину 65%. К 80 годам в первом случае недобирается 57%, а во втором 64% углерода. Если при неизменных глобальных условиях окружающей среды мы видим незначительное снижение запасов углерода после 40 – 50 лет, то в условиях повышенного содержания углекислого газа в атмосфере и повышения температуры воздуха, такого снижения не происходит, а до конца срока моделирования остается хоть и незначительный, но рост запасов углерода.

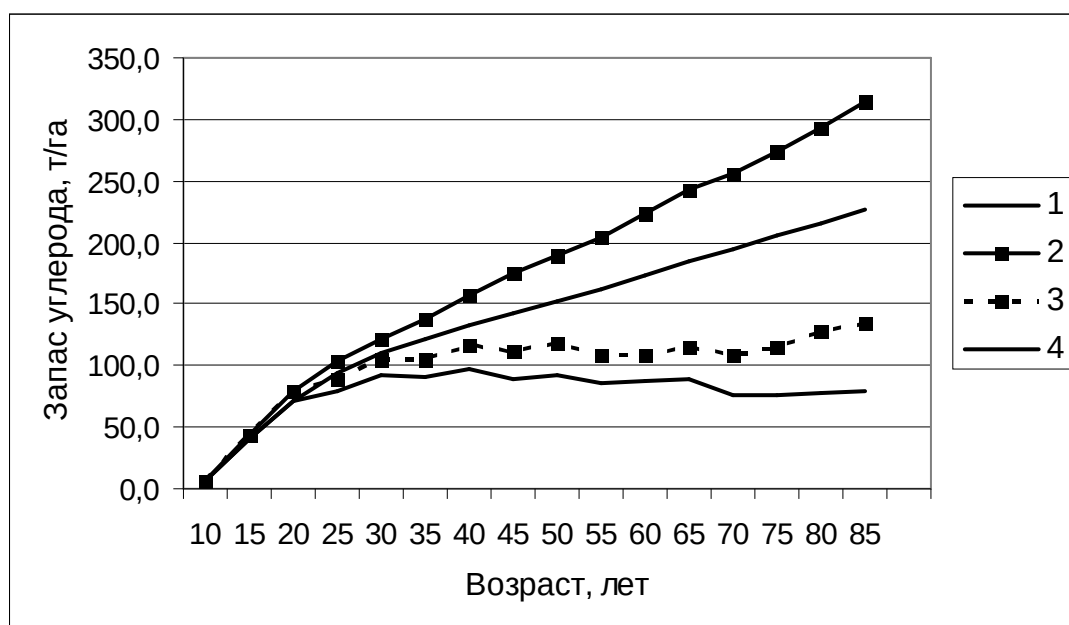


Рис. 6.28. Возрастная динамика накопления углерода в сосновом древостое при совместном влиянии рубок промежуточного пользования и изменения условий окружающей среды.

1 – контроль; 2 – развитие по сценарию № 2; 3 – воздействие только промежуточного пользования; 4 – воздействие промежуточного пользования и глобальных изменений условий окружающей среды по сценарию № 2.

Мы не исключаем, что прогнозируемые изменения содержания углекислого газа в атмосфере и повышения температуры воздуха должны привести к увеличению массы углерода в лесных насаждениях на 16 – 57%, в зависимости от их масштабов, и интенсифицировать процесс поглощения углекислого газа сосновыми культурами региона исследований на 10 – 24%. Вместе с тем, сохранятся пропорции в распределении органического углерода между отдельными фракциями. Коренных изменений запасов углерода в насаждениях в ответ на промежуточное пользование при этом ожидать не следует.

6.3. Рекомендации по созданию культур и ведению хозяйства с целью депонирования углерода

Как показали наши исследования, применение рациональной системы ухода за лесными насаждениями может значительно изменить их углерод-депонирующую функцию. Основными антропогенными факторами, которые могут оказать воздействие на углеродный баланс в лесном секторе, являются интенсивность и частота рубок ухода, оборот рубки главного пользования, срок жизни и способ использования изделий, изготовленных с использованием лесной биомассы. На глобальном балансе углерода положительно скажется использования лесной биомассы, как возобновимого источника биотоплива, взамен ископаемого, и для изделий, заменяющих материалы, требующие для своего производства значительных энергетических затрат. Нельзя исключать положительной роли лесной селекции в создании более продуктивных, а значит и поглощающих большие количества углерода насаждений.

Целью создания углероддепонирующих насаждений является усиление процессов поглощения углекислого газа из атмосферы и консервация его в органическом веществе лесных биогеоценозов и продуктах, созданных из древесины и других фракций, наряду с получением максимально возможных объемов древесины, как в результате рубок промежуточного, так и главного пользования. Необходимо стремиться к обеспечению максимальной интенсивности поглощения углекислого газа из атмосферы, высоким запасам углерода в лесном биогеоценозе на протяжении всего периода роста, и формированию деревьев позволяющих получить «долгоживущие», преимущественно крупномерные, сортименты. Дополнительные требования к этим насаждениям – обеспечение экологической устойчивости и сохранности на протяжении всего цикла выращивания; обеспечение сохранности и повышения плодородия почвы; выполнение водоохраных и защитных функций. Уместно отметить, что высокие запасы углерода в насаждении тесно коррелируют с высокими запасами биомассы.

При закладке насаждений и уходе за ними надо основываться на местном опыте создания культур сосны высокой продуктивности и устойчивости. Необходимо использовать современные достижения лесной науки и передового опыта. По возможности необходимо максимальное применение современных средств механизации, позволяющих значительно снизить затраты на создание и уход за насаждениями.

При выборе места создания углероддепонирующих насаждений целесообразно ориентироваться на социально-экономические и экологические

особенности региона. Желательно избегать территорий, подверженных очень сильному уровню техногенной нагрузки, т.е. располагать их на достаточном удалении от крупных промышленных центров, что позволит без дополнительных затрат избежать 20 – 25%-ой потери их углероддепонирующей функции. Желательно располагать насаждения в условиях произрастания, обеспечивающих рост древостоя по высоким классам бонитета (I^a – II).

Способы и приемы подготовки почвы применяют дифференцировано, в зависимости от типов условий местопроизрастания. Следует избегать значительного механического нарушения почвенного покрова и огневого способа подготовки. Сильное воздействие на почвенный покров, вызывающее дополнительную эмиссию углекислого газа из почвы и лесной подстилки, может быть оправдано лишь в том случае, если оно способствует значительному улучшению роста культур и ускорению сроков их смыкания.

Культуры создаются посадкой 1 – 2-летних сеянцев вручную или лесопосадочными машинами. Исходную густоту углероддепонирующих насаждений необходимо устанавливать с таким расчетом, чтобы в процессе их выращивания можно было вести селекционные разреживания, оставляя до рубки главного пользования деревья способные дать выход более долгоживущих (как правило, более крупных) сортиментов. Такой подход позволит оттянуть срок эмиссии углерода из лесных продуктов в атмосферу [357]. С этих позиций густота культур должна составлять 4 - 8 тыс. шт./га.

Особое значение для углероддепонирующих насаждений имеет своевременное и эффективное применение противопожарных мероприятий.

Рубки ухода не могут повысить запасы углерода в лесном биогеоценозе выше уровня присущего данному типу леса, но они способны изменить аллокацию углерода, сконцентрировать его в меньшем количестве «лучших» деревьев. Они должны поднять углероддепонирующую функцию насаждений посредством двух следующих механизмов: 1) т.к. значительная часть углерода теряется при поступлении деревьев в отпад и последующим их разложении, то использование деревьев потенциального отпада положительно скажется на углеродном балансе в целом; 2) рационально организованные рубки ухода должны сократить срок наступления главной рубки, и сконцентрировать биомассу в крупных деревьях, дающих необходимые народному хозяйству сортименты, дольше сохраняющие углерод в своей массе. Нетто сток углерода при проведении рубок ухода увеличится в том случае, если срок жизни изготовленных из вырубленных

деревьев продуктов превышает срок пребывания древесного детрита под пологом насаждения. Положительно на глобальном балансе углерода скажется и использования вырубаемой биомассы в качестве биотоплива, что снижает эмиссию углекислого газа от сжигания ископаемого топлива. Однако, если рубки ухода позволяют получить древесину для изделий со значительным сроком эксплуатации, то их проведение может быть оправдано и при несоблюдении предыдущих условий. Проведение рубок ухода дает массу других преимуществ, напрямую не связанных с депонированием углерода. При планировании и проведении рубок ухода необходимо стараться избегать повреждений оставляемых деревьев, значительных нарушений почвенного покрова, снижения устойчивости к ветру, вредителям и болезням, других негативных последствий. Рубки ухода должны носить, прежде всего, санитарный, а также селекционный, характер.

Рубки ухода в молодняках необходимо проводить не чаще, чем раз в 7 – 15 лет, степень изреживания – преимущественно умеренная. При угрозе заглушения культур сосны быстрорастущими лиственными породами, может оказаться целесообразным более частое проведение рубок ухода. В смешанных насаждениях, загущенных культурах или в санитарных целях допустимо применение рубок сильной степени изреживания.

Сосна светолюбива и при наличии поросли лиственных пород нуждается в своевременном освещении. В молодых культурах необходимо вести систематические наблюдения за развитием и численностью хвоегрызущих и других вредных насекомых. В случае угрозы нападения вредителей применяются микробиологические и химические методы борьбы с ними.

Повторяемость рубок ухода в более старших насаждениях должна быть не чаще 15 – 20 лет при слабой интенсивности изреживания. Более частое проведение или увеличение интенсивности рубки может быть оправдано лишь при условии чрезмерно высокой полноты насаждения, грозящей снижением его устойчивости. Полнота насаждения после проведения рубки ухода не должна опускаться ниже 0,8. Проходные рубки в возрасте 50 лет и выше оказывают отрицательное воздействие на выполнение углероддепонирующими насаждениями их основной функции, однако они допустимы в случае интенсивного ведения лесного хозяйства и максимально полной утилизации вырубаемой биомассы.

В процессе рубки главного пользования необходимо организовать возможно полное использование древесной биомассы и обеспечить лесовозобновление в кратчайшие сроки. Если есть возможности для проведения постепенных рубок, то необходимо воспользоваться ими, т.к. они положительно сказываются на углеродном балансе, сокращая оборот рубки и

предотвращая значительные потери углерода из органических соединений почвы.

Выводы

1. Результаты многолетних наблюдений за ростом сосновых культурценозов позволили создать адекватную, устойчивую и чувствительную модель динамики накопления углерода в сосновых древостоях, древесном детрите и вырубленной в результате промежуточного пользования древесине. Входными параметрами модели являются: характеристики внутреннего состояния популяции, условия произрастания, погодноклиматические условия, содержание углекислого газа в воздухе, уровень техногенной нагрузки и программа рубок промежуточного пользования. На выходе модели – возрастная динамика запасов углерода, распределенная по отдельным фракциям.
2. Результаты моделирования показывают, что насаждения I^a бонитета к 80 годам в среднем накапливают 275 т·га⁻¹ углерода, I бонитета – 216 и II бонитета – 174. Наиболее высокие темпы накопления углерода характерны для 20 – 40 летних насаждений. Основная масса углерода сосредотачивается в стволовой древесине (60% – 67%); доля древесного детрита составляет 2% – 10% общего запаса.
3. Установлено, что рубки промежуточного пользования способны изменить интенсивность накопления и общие запасы углерода в лесных биогеоценозах. Наиболее приемлемыми, с точки зрения депонирования углерода лесными насаждениями, являются рубки слабой интенсивности изреживания.
4. Разработанная нами модель позволяет оценить сдвиги в углеродном балансе соснового насаждения, вызванные глобальным изменением климата и состава атмосферного воздуха. Наиболее вероятные уровни повышения концентрации углекислого газа в атмосфере и температуры воздуха приведут к увеличению интенсивности поглощения углекислого газа насаждениями на 10 – 24% и общих запасов углерода в них от 16 до 57%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенные исследования подтверждают положение о том, что лесные биогеоценозы, в силу интенсивного обмена веществом и энергией с окружающей средой и наличия в них высоких запасов органического вещества, имеют значительный потенциал в стабилизации газового состава атмосферы и климата [322, 307]. Насаждения сосны обыкновенной искусственного происхождения в условиях Полесско-Приднепровского геоботанического округа подзоны грабовых дубрав накапливают углерод со средней скоростью $2,0 - 2,7 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$, что соответствует поглощению $7,3 - 9,9 \text{ т}$ углекислого газа одним гектаром леса в год. Максимальная интенсивность накопления углерода приходится на 30 – 40-летний возраст [355, 323].
2. Сосновые биогеоценозы искусственного происхождения I класса бонитета к V классу возраста накапливают в органических соединениях $180 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ углерода [355, 320], из них около 80% сосредоточено в древесном ярусе, главным образом в составе стволовой древесины [320]. С увеличением возраста насаждения доля древесного яруса в общем запасе углерода увеличивается. В лесной подстилке накапливается в среднем $14 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ углерода, а в составе органических веществ минеральных горизонтов почвы – $13 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ [323], в подпологовой древесной растительности в среднем сосредотачивается $8 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ углерода, в живом напочвенном покрове – менее $1 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ [305, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 317,].
3. Запас углерода в культурах сосны, при сложившейся системе проведения рубок промежуточного пользования, не соответствует своему потенциальному уровню [355, 323]. К 60 годам сосновые культуры накапливают углерод на 17%, а к 80 – на 32% меньше от возможного. Соблюдение повторяемости рубок ухода в 7 – 15 лет в молодняках и 15 – 20 лет, со слабой степенью изреживания, в средневозрастных и приспевающих насаждениях, при умеренном количестве изымаемой в результате промежуточного пользования древесины, позволит повысить углероддепонирующую функцию сосновых насаждений [323].
4. Величина потока углекислого газа из сосновых фитоценозов, формируемая за счет дыхания гетеротрофных организмов, разлагающих древесный детрит, лесную подстилку и гумусовые вещества минеральных горизонтов почвы, зависит от температуры окружающей среды, влаж-

ности разлагающихся объектов и уровню техногенного загрязнения [326, 328]. Высокий и очень высокий уровень техногенного загрязнения ингибирует выделение углекислого газа на 10% - 80%. В диапазоне от 5° до 25° С температура оказывает положительное влияние на интенсивность выделения углекислого газа в результате разложения органического вещества; повышение температуры воздуха на 1 °С увеличивает интенсивность этого процесса на 3 - 12% [304].

5. Разработанная имитационная модель накопления углерода в искусственных насаждениях сосны обыкновенной разного возраста [334] позволяет оценить воздействие ряда эндогенных и экзогенных факторов на накопление углерода в древостое, древесном детрите и древесине промежуточного пользования. Показано, что с повышением бонитета насаждения на один класс общий запас углерода в нем увеличивается в среднем на 20%. При высоком и очень высоком уровне техногенного загрязнения территории снижаются интенсивность накопления и общие запасы углерода в насаждении соответственно на 18 - 40% и 15 - 23% [315, 344, 356, 339, 319]. Прогнозируемое увеличение содержания углекислого газа в атмосфере и повышение температуры воздуха должны повлечь за собой увеличение интенсивности накопления углерода в насаждении на 10 - 24% и общих запасов на 16 - 57% [335].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Парниковый эффект, изменение климата и экосистемы: пер. с англ./ Болин Б., Десс Б. Р., Ягер Дж., Уоррик Р. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 560 с.
2. Ricklefs R.E. Ecology. – New-York: W.A. Freeman and company, 1990. – 898 p.
3. Burschel P. Das menetekel-klimaänderung // Allg. Forstz. – 1990. – Vol. 45, № 11. – P. 255 – 257.
4. Логинов В.Ф. Основы экологии и природопользования: учебное пособие. – Мн., 1998. – 321 с.
5. Saugier B. Bilan carbone des ecosystèmes forestiers // Fonctionnement arbres et écosyst. Forest: Rapp. Joumees sci. et Techn, Nancy, 18–19 Juin 1997. – Rev. forest Fr. – 1999. – Vol. 51, № 2. – P. 239 – 253.
6. Тарко А. Н., Нефедова Е. И., Усатюк В. В. Моделирование крупномасштабных последствий воздействия хозяйственной деятельности на биосферу // Обозрен. прикл. и пром. мат.– 1996.– Т. 3, № 3.– С. 389 – 400.
7. Писаренко А.И. Глобальное управление бореальными лесами: целесообразность или неизбежность // Устойчивое развитие бореальных лесов: Труды VII ежегодной конференции МАИБЛ, С.Петербург, 19 – 23 авг., 1996 г. / СПбНИИЛХ. – М., 1997. – С. 3 – 16.
8. Результаты измерений концентрации углекислого газа в приземной атмосфере Антарктиды (Обсерватория «Мирный» 1983 – 1984)/ И.В. Замышляев, Б.А. Руденко, Н.П. Шоромов, С.В. Юдачев // Труды ЦАО.– 1998.– Вып. 170.– С. 44 – 50.
9. Парниковый эффект: проблемы и решения. Информационный бюллетень.– Мн.: БелНИЦ «Экология», 1997.– № 6 (13).– 18 с.
10. Свиридов М.В. Попов В.К. Изменение климатических условий ЦЧР вследствие антропогенного потепления // Комплексная продуктивность лесов и организация многоцелевого (многопродуктового) лесопользования: Тез. Всероссийской конференции, Воронеж, 13 – 14 дек. 1995 г. / ВГЛТА. – Воронеж, 1996.– С. 182 – 184.
11. Cubasch U., Hegerl G. C., Wazkewitz J. Prediction, detection and regional assessment of anthropogenic climate change // Geophysica.– 1996.– Vol. 32, № 1 – 2.– P. 73 – 96.
12. Кондрашева Н.Ю., Кобак К.И., Турчинович И.Е. Возможные реакции наземной растительности на увеличение концентрации CO₂ в атмосфере и глобальное потепление // Лесоведение.– 1993.– № 4.– С. 71 – 76.

13. Assessment of CO₂ fluxes and effects of possible climate changes on forests in Estonia / M. Mandre, H. Tullus, V. Reisner, J. Klooseiko // *Climate change, Biodiversity and Boreal Forest Ecosyst: Pap. select Int. Boreal Forest Res. Assoc. Conf., Joensuu, 30 July – 5 Aug., 1995. – Silva fenn. – 1996. – Vol. 30, № 2 – 3. – P. 259 – 268.*
14. Temporal and spatial variations of terrestrial biomes and carbon storage since 13000 yr. BR in Europe: Reconstruction from pollen data and statistical models / C.H. Peng, S. Guiot, E. Campo, R. van Cheddadi // *Boreal forests and glob. Change: Int. Boreal Forest Res. Assoc. Conf., Saskatoon, 25 – 30 Sept. 1994. – Water, air and soil pollut. – 1995. – Vol. 82, № 1 – 2. – P. 375 – 390.*
15. Кондрашева Н.Ю. Роль лесов в углеродном цикле планеты // *Роль науки в создании лесов будущего: Тезисы докладов на Всесоюзной конференции молодых ученых, г. Пущино Московской обл., 5 – 7 мая 1981 г. – Л.: ЛенНИИЛХ, 1981. – С. 184 – 185.*
16. Горшков В. Г., Кондратьев К. Я., Лосев К. С. Глобальная экодинамика и устойчивое развитие, естественнонаучные аспекты и «человеческое измерение» // *Экология. – 1998. – № 3. – С. 163 – 170.*
17. Кадацкий В.Б. Биосфера как система. – Мн.: Бел. Нав., 1997. – 151 с.
18. Чупрова В.В. Баланс углерода в агроэкосистемах средней Сибири // *Сиб. экол. ж. – 1997. – Т. 4, № 4. – С. 355 – 361.*
19. Замолотчиков Д.Г., Карелин Д.В., Иващенко А.И. Углеродный баланс тундровых ландшафтов Центральной Сибири: наблюдения и моделирование на геоинформационной основе // *Ж. общ. биол. – 1997. – Т. 58, № 2. – С. 15 – 34.*
20. Вомперский С. Э. Биосферное значение болот в углеродном цикле // *Баланс углерода в России. – М., 1998. – С. 44 – 50.*
21. Содержание и скорость аккумуляции углерода в болотах бывшего СССР / Н.С. Боч, К.И. Кобак, Т.П. Кольчугина, Т.С. Винсон // *Гидролесомелиорация: задачи и координация исследований. – СПб: СПбНИИЛХ, 1994. – С. 73 – 75.*
22. Вомперский С. Э. Роль болот в круговороте углерода // *Чтения памяти академика А. Н. Сукачева. XI Биогеоценотические особенности болот и их рациональное использование: сб. науч. работ. – М.: Наука, 1994. – С. 5 – 37.*
23. Бамбалов Н. Н., Ракович В. А. Биологический и геологический круговорот веществ в болотах // *Генезис, эволюция и роль болот в биосферных процессах: Тез. докл. междунар. конф. – Мн., 1994. – С. 3 – 4.*
24. Уткин А.И. Углеродный цикл и лесоводство // *Лесоведение. – 1995. – № 5. – С. 3 – 20.*

25. Padrazsky V. Fixace uhliku Lesnimi ekosystemy // Les. pr. – 1996.– Vol. 75, № 8.– P. 279 – 302.
26. Belausteguigoitia J.C., Ibararan M.E. Economical instruments for the reduction of greenhouse gas emissions: The Mexican case // Interciencia.– 1995.– Vol. 20, № 6.– P. 366 – 369.
27. Курбанов Э. А., Соколов П. А. Роль лесов России в глобальной защите климата // Диалог на рубеже 20 – 21 вв. и глобальные проблемы современности: 1 Вавиловские чтения постоянно действующей междисциплинарной научной конференции. – Йошкар-Ола, 1996. – С. 307 – 309.
28. Нильсон С., Швиденко Л. Симпозиум «Состояние лесов в России» Российский лесной сектор»: Постановочный доклад.– СПб, 1997.– 61 с.
29. Brown S. Present and potential roles of forests in the global climate change debate // Unsylva. – 1996. – Vol. 47, № 185.– P. 3 – 10.
30. Кобак К.И., Кукуев Ю.А., Трейфельд Р.Ф. Роль лесов в изменении содержания углерода в атмосфере (на примере Ленинградской обл.) // Лесное хозяйство. – 1999. – № 2. – С. 43 – 45.
31. Masera O.R. Carbon mitigation scenarios for Mexican Forests: Methodological considerations and results // Interciencia.– 1995.– Vol. 20, № 6.– P. 388 – 395.
32. Carbon dynamics of Mexican tropical evergreen forest: Influence of forestry mitigation options and refinement of carbon-flux estimates / M.A. Cairns, J.R. Barker, R.W. Shea, P.K. Haggerty // Interciencia.– 1995.– Vol. 20, № 6.– P. 216 – 223.
33. Wegner G., Fruhwald A. Der beitrang der holzerwendung zum un-weltschufz // Wald und Holz Dienst Umwelt: 7 int. men. Kongr. Interforest. – Schifflenr. Forstwiss. – Munchen, 1994 / Fak. Univ. München und Bayer. forste. Versuch-und-Forschungsanst.– Munchen, 1994.– № 142.– P. 121 – 149.
34. Карабань Р.Т., Кокорин А.О., Назаров И.М. Поглощение CO₂ лесами России // Метеорология и гидрология. – 1993. – № 1. – С. 5 – 14.
35. Dabas M., Bhatias S. Carbon sequestration through afforestation: role of tropical industrial platations // AMBIO.– 1996.– Vol. 25, № 5.– P. 327 – 330.
36. Krankin O.N., Harmon O.E., Winjum J.K. Carbon storage and seques-tration in the Russian forest sector // AMBIO.– 1996.– Vol. 25, № 4.– P. 284 – 288.
37. Joyotee S., Sara J.S. Forest carbon and local livelihoods: Assessment of opportunities and policy recommendations // CIFOR (Occasional paper). – 2002. – № 37. – 46 p.
38. Brown S. Forests and climate change: role of forest lands as carbon sinks // A. Forest and tree resources: Proceedings of the XI World forestry con-

gress, Antalya, Turkey, 13 – 22 October 1997. – Volume 1. – Antalya, 1997. – P. 117 – 129.

39. Писаренко А.И. Перспективы увеличения депонирования углерода в лесах России // Лесное хозяйство. – 2001. – № 1. – С. 2 – 6.

40. Усольцев В.А. Международный лесной мониторинг, глобальные экологические программы и базы данных о фитомассе лесов. – Екатеринбург, 1995. – 91 с.

41. Karjalainen T., Apps M. Carbon sequestration in the global forest sector // XXI IUFRO world congress: Congr. workshops, Kuala Lumpur, Malaysia, 7-12 August 2000.– Kuala-Lumpur, 2000. – P. 557.

42. Мелочников А.С., Кравцов С.З. Лес и глобальное изменение климата // Лесное хозяйство.– 1997.– № 5.– С. 33 – 44.

43. Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change. – Kyoto, 1997. – 23 p.

44. An economic approach to planting trees for carbon storage / J.P. Peter, O.H. David, K. Bengt e.a. // Environmental Science and Technology. – 1997. – Vol. 27 (Special). – P. 9 – 21.

45. Balteiro D.L., Romero C. Forest management and carbon captured: analytical aspects and policy implications // Invest. Agr. – 2001. – № 1. – P. 153 – 165.

46. Bov B.E., Richard A.B., Linda S.H. The Kioto Protocol and Forestry Practicies in the United States // XXI IUFRO world congress: Congr. workshops, Kuala Lumpur, Malaysia, 7-12 August 2000.– Kuala-Lumpur, 2000. – P. 566–576.

47. David B. The combined challenge of forestry and terrestrial carbon management // XXI IUFRO world congress: Congr. workshops, Kuala Lumpur, Malaysia, 7-12 August 2000.– Kuala-Lumpur, 2000. – P. 558–564.

48. Marland G., Schlmadinger B. Forest for carbon sequestration or fossil fuel substitution? A sensitivity analysis // Forest and tree resources: Proceedings of the XI World forestry congress, Antalya, Turkey, 13 – 22 October 1997. – Volume 1. – Antalya, 1997. – P. 139 – 148.

49. Tabeaut M., Simon L. Forests et rechauffement global // Simp. Probs. environ. planet: Bull. Assoc. geogr. fr. – 1996.– Vol. 79, № 4.– P. 313 – 323.

50. Писаренко А.И. Глобальная деградация лесов и проблемы лесного хозяйства // Лесное хозяйство.– 1989.– № 10.– С. 5 – 10.

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

52. Писаренко А.И. Бореальные леса и проблемы регулирования углеродного баланса планеты // Современные технологии воспроизводства целевых лесов в Юго-Западном регионе центральной части России: Мате-

риалы международной научно-производственной конференции.– Брянск, 2002.– С. 6 – 11.

53. Замолодчиков Д.Г., Карелин Д.В., Иващенко А.И. Послепожарные изменения углеродного цикла в Южнотаежных тундрах // Экология.– 1998. – № 4.– С. 272 – 276.

54. McNulty S.G. Hurricane impacts on US forest carbon sequestration // Environmental Pollution. – 2002. – Vol. 116. – P. 17 – 24.

55. Пожары в бореальных лесах и выброс парниковых и химически активных газов / Д.С. Ливайн, Д.Р. Кейхун, У.Р. Коффер и др. // Устойчивое развитие бореальных лесов: Труды VII ежегодной конференции МАИБЛ, С.Петербург, 19 – 23 авг., 1996 г. / СПбНИИЛХ.– М., 1997.– С. 56 – 62.

56. Ведрова Э.Ф. Баланс углерода в сосняках Средней Сибири // Сиб. экол. ж. – 1997.– Т. 4, № 4. – С. 375 – 383.

57. Сеннов С.Н. Влияние лесохозяйственной деятельности на углеродный баланс // Лесное хозяйство. – 1998. – № 5. – С. 25 – 26.

58. Thornley J.H.M., Cannell G.R. Managing forests for wood yield and carbon storage: a theoretical study // Tree physiology. – 2000. – Vol. 20. – P. 77 – 484.

59. Современные оценки роли лесов в углеродном цикле / К.И. Кобак, Н.Ю. Кондрашева, Г.А. Ширяева, Т.С. Гутман // Тр. Гос. гидрол. ин-та.– 1985, № 339.– С. 3 – 37.

60. Титлянова А.А., Косых Н.П. Изменение продуктивности ландшафтов Западной Сибири в связи с различным использованием земель (на примере Новосибирской области) // Сиб. экол. ж. – 1997.– Т. 4, № 4.– С. 347 – 354.

61. Karjalainen T., Kellomeki S., Pussinen A. Role of wood-based products in absorbing atmospheric carbon // Silva fenn.– 1994.– Vol. 28, № 2.– P. 67 – 80.

62. Forêts et augmentation de la concentration atmosphérique en CO₂ Effets bénéfiques ou adverses? : Rapp. Joumees sci. et Techn. / J.–M. Guehl, C. Picon, P. Vivin, H. Cochard // Rev. forest Fr. – 1999. – Vol. 51, № 2. – P. 254 – 265

63. Букша І.Ф., Пастернак В.П., Бондарук Г.В. Сценарне моделювання та прогнозу динаміки лісових ресурсів при змінах клімату // Лісівництво і агролісомеліорація.– 2000.– Вип. 98.– С. 44 – 52.

64. Climate – a changing component of forest site // Folia forestalia polonica. – Series A – Forestry. – 1991. – № 33.– P. 25 – 34.

65. Longleaf pine photosynthetic response to soil resource availability and elevated atmospheric carbon dioxide / G.B.V. Runion, R.J. Mitchell, T.H. Green e.a. // J. Environ. Qual.– 1999.– Vol. 28, №3.– P. 880 – 887.

66. Effects of climate change and nitrogen deposition on the carbon sequestration of a forest ecosystem in the boreal zone / R. Makipaa, T. Karjalainen, A. Pussien, S. Kellomaki // Can J. Forest Res.– 1999.– Vol. 29, № 10.– P. 1490 – 1501.

67. Van Minnen J.G., Klein G.K., Leemans R. The importance of feedback processes and vegetation transition in the terrestrial carbon cycle // J. Biogeogr. – 1995. – Vol. 22, № 4 – 5. – P. 805 – 814.
68. Пуссинен А., Карьялайнен Т., Келломяки С. Вклад лесного сектора в фиксацию углерода при изменении климатических условий в Финляндии // Устойчивое развитие бореальных лесов: Труды VII ежегодной конференции МАИБЛ, С.Петербург, 19 – 23 авг., 1996 г. / СПбНИИЛХ. – М., 1997. – С. 78 – 87.
69. Amthor J. Predicting effects of atmospheric CO₂ partial pressure on forest photosynthesis // J. Biogeographi. – 1995. – Vol. 22, № 2 – 3. – P. 269 – 280.
70. К оценке динамики бореальных лесов при антропогенном потеплении климата / А.А. Величко, В.П. Гричук, Э.М. Зеликсон, О.К. Борисова // Северные леса: состояние динамика, антропогенное воздействие: Междунар. Симп., Архангельск, 16 – 26 июля, 1990. – М., 1990. – С. 19 – 29.
71. Forest carbon balance under elevated CO₂ / G.H. Jason, H.DL. Evan, G. Kate e.a. // Oecologia. – 2002. – Vol. 131. – P. 250–260.
72. Contribution of Increasing CO₂ and Climate to Carbon Storage by Ecosystems in the United States / D. Schimel, J. Melillo, D. Kicklight e.a. // Science. – 2000. – Vol. 287. – P. 2004 – 2006.
73. Джордж М.В., Ричард Э.Х. Тайна великого северного леса // Устойчивое развитие бореальных лесов: Труды VII ежегодной конференции МАИБЛ, С.Петербург, 19 – 23 авг., 1996 г. / СПбНИИЛХ. – М., 1997. – С. 39 – 46.
74. Klein H. Wie sich Wald und Klima gegenseitig beeinflussen // Okol. Und Landbau. – 1996. – Vol. 24, № 2. – P. 65 – 67.
75. Szujewski A. Some problems of forest policy at the dawn of the XXIst century // XIII Kongres UEF. – Polska, Gdansk, 1995. – P. 3 – 18.
76. Кобак К.И., Кондрашева Н.Ю. Влияние промышленного загрязнения на лесные экосистемы и мероприятия по повышению их устойчивости // Всесоюзн. науч.-практ. Совещ: Тез. докл., ЛитНИИЛХ 26 – 27 июня 1984. – Каунас – Гирионис. – 1984. – С.18.
77. Woodwell G.M., Haughton R.A. Are terrestrial ecosystems accumulating carbon // Physiol. plant. – 1990. – Vol. 79, № 2. – P. 126.
78. Замолотчиков Д.Г., Карелин Д.В. Исследование углеродного цикла экосистем термальных источников Чукотки как естественной модели потепления // Экология. – 2000. – № 6. – С. 419 – 425.
79. Hendrik P.M., Laure N. Plant growth and competition at elevated CO₂: on winners, losers and functional groups // New Phytologist. – 2003. – Vol. 157. – P. 175–198.

80. Darrigo R.D., G.C.J. Tree growth-climate relationships at the northern boreal forest tree line of north-america - evaluation of potential response to increasing carbon-dioxide // *Global Biogeochemical Cycles*. – 1993. – Vol. 7, № 3. – P. 525 – 535.

81. Norbert K., Deying X. Climate change effects on forests // *Caring for the forest: Research in a changing world: Congress report*,: IUFRO XX World congress, Tampere, Finland, 6 – 12 August 1995. – Vol. II. – Jyväskylä: IUFRO, 1996. – P. 34 – 43.

82. Кайбияйнен Л.К., Блондинский В.К., Софронова Г.И. Фотосинтетический сток углерода в сосновых древостоях вблизи крупных источников промышленной эмиссии поллютантов // *Экология*. – 1998. – № 2. – С. 83 – 88.

83. The global terrestrial carbon cycle / T.M. Smith, W.P. Gramer, R.K. Dixon e.a. // *Water, air and soil pollut.* – 1993. – Vol. 70, № 1 – 4. – P. 19 – 37.

84. Heimann M.A Review of the contemporary global carbon cycle and asseen a century ago by Arrhenius and Högban // *AMBIO*. – 1997. – Vol. 26, № 1. – P. 17 – 24.

85. Brown S., Gillespie A.J.R., Lugo A.E. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data // *Forest Science*. – 1989. – Vol. 35, № 4. – P. 881 – 902.

86. Моисеев Б.Н., Алферов А.М., Страхов В.В. Об оценке запаса и прироста углерода в лесах России // *Лесное хозяйство*. – 2000. – № 4. – С. 18 – 20.

87. Carbon stock and deposition in phytomass of the Russian forests / A. Isaev, G. Korovin, D. Zamolodchicov, A. Utkin // *Boreal Forest and Glob. Change: Pap. Int. Boreal Forests Res. Assoc. Conf.*, Saskatoon, 25 – 30 Sept. 1994. – *Water, Air and Soil Pollut.* – 1995. – Vol. 82, № 1–2. – P. 247 – 256.

88. Carbon in vegetation of Russian forests: Methods to estimate storage and geographical distribution / V. Alexeyev, R. Birdsey, V. Stakanov, I. Korotkov // *Boreal Forest and Glob. Change: Int. Boreal Forests Res. Assoc. Conf.*, Saskatoon, 25 – 30 Sept. 1994. – *Water, Air and Soil Pollut.* – 1995. – Vol. 82, № 1–2. – P. 271 – 282.

89. Carbon storage in forests and peatlands of Russia / eds: V.A. Alexeyev, R.A. Birdsey: *Gen. Tech. Rep. NE-244*. – Radnor, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, 1998. – 137 p.

90. Опыт агрегированной оценки основных показателей биопродукционного процесса и углеродного бюджета наземных экосистем России. 1. Запасы растительной органической массы / А.З. Швиденко, С. Нильсон, В.С. Столбовой и др. // *Экология*. – 2000. – № 6. – С. 403 – 410.

91. Писаренко А.И. Экологические аспекты управления лесами России // *Лесное хозяйство*. – 2000. – № 3. – С. 8–10.

92. Kokorin A.O., Leliakin A.L., Nazarov I.M. CO₂ sinks and emissions in forests of the Russian Federation // Workshop Greenhouse Gas Emiss. and Response Policies Centr. and East. Eur., Budapest, 11 – 14 May 1995. – Idojaras.– 1995.– Vol. 99, № 3–4.– P. 307 – 318.
93. Carbon reservoirs in peatlands and forests in the boreal region of Finland / P.E. Kuppi, M. Posch, P. Hanninen e.a. // Silva fenn.– 1997. – Vol. 31, № 1. – P. 13 – 25.
94. Galinski W., Kupperts M. Polish forest ecosystems: The influence of changes in the economic system on the carbon balance // Clim. Change.– 1994.– Vol. 27, № 1.– P. 103 – 119.
95. Jungkeit R., Hutter M. Waldokosysteme Nordrhein-Westfalens-Ihr leistungsvermogen als senke fur atmospharisches CO₂ // Erde. – 1996. – Vol. 127, № 1.– P. 23 – 24.
96. Raev I., Asan Ü., Grozev O. Accumulation of CO₂ in the above-ground biomass of the forests in Turkey and Bulgaria in the recent decades // Forest and tree resources: Proceedings of the XI World forestry congress, Antalya, Turkey, 13 – 22 October 1997. – Vol. 1. – Antalya, 1997. – P. 131 – 138.
97. Mickler R.A., Earnhardt T.S., Moore J.A. Regional estimation of current and future forest biomass // Environmental Pollution. – 2002. – Vol. 116. – P. 7 – 16.
98. Birdsey R.A. Inventory of carbon storage and accomulation in US forest ecosystems // Sci. Forest. IUFRO's 2nd century: 19th Word Congr., Montreal, 5 – 11 Aug., 1990 / Int. Union Forest Res. Organ. – Montreal, 1990.– P. 462.
99. Carbon dioxide uptake by an undisturbed tropical rane forest in Southern Amazonia, 1992 to 1993 / J. Grace, J. Uoyd, J. McIntyre e.a. // Science.– 1995.– Vol. 270, № 5237.– P. 778 – 780.
100. Carbon dioxide transfer over a Central Amazonian rain forest / M. Yadvinder, A.D. Nobre, J. Grace e.a. // J. Geophys. Res. D.– 1998.– Vol. 103, № 24.– P. 31593 – 31612.
101. Sanchez-Azofeifa G.A., Quesada-Mateo C. Deforestation, carbon dynamics, and sustainable mitigation measures in Costa Rica. The Puerto Viejo de Sarapiquí case study // Interciencia. – 1995. – Vol. 20, № 6.– P. 396 – 400.
102. Колосок О.Н. Первичная нетто-продукция и депонированный углерод искусственных еловых древостоев украинских Карпат // Проблемы лесоведения и лесоводства: Сб. научн. трудов Института леса НАН Б. – Гомель, 2001.– Вып. 53.– С. 80 – 83.
103. Dinamics associated with total aboveground biomass, C, nutrient pools, and biomass burning of primary forest and pasture in Rodonia, Brazil during SCAR-B / L.S. Guild, J.B. Kaufman, L.J. Ellingson, D.L. Cummings // J. Geophys. Res. D. – 1998. – Vol. 103, № 24. – P. 32091–32100.

104. Schoeder P. A carbon budget for Brazil: Influence of future landuse change // *Clim. Change.* – 1996. – Vol. 33, № 3. – P. 369 – 383.
105. Potter C.S., Klooster S.A. Detecting a terrestrial biosphere sink for carbon dioxide: Internnual ecosystem modeling for the mid-1980s // *Clim. Change.* – 1999. – Vol. 42, № 3. – P. 489 – 503.
106. Лакида П.И. Динамика запасов углерода в лесах Украины // *Проблемы лесоведения и лесоводства: Сб. научн. трудов Института леса НАН Б. – Гомель, 2001. – Вып. 53. – С. 86 – 90.*
107. Опыт агрегированной оценки основных показателей био-продукционного процесса и углеродного бюджета наземных экосистем России. 1. Запасы растительной органической массы / А.З Швиденко., С. Нильссон, В.С. Столбовой и др. // *Экология.* – 2000. – № 6. – С. 403 – 410.
108. Liski J., Kauppi P. Carbon cycle and biomass // *Forest Resources of Europe, CIS, North America, Australia, Japan and New Zeland (Industrialized/ Boreal Countries): United Nations - Economic Commission for Europe / Food and Agricultural Organization Contributions to the Global Forest Resources Assessment 2000.* –N. Y.: United Nations, 2000. – P. 155–171.
109. Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Пряжников А.А. Методы определения депонирования углерода фитомассы и нетто-продуктивности лесов (на примере республики Беларусь) // *Лесоведение.* – 2003. – № 1. – С. 48–57.
110. Рожков Л.Н. Лесоводственно-экологические основы устойчивого функционирования лесов Беларуси в условиях рекреационного использования: Дис. ... докт. с.-х. наук: 06.03.03 / ИЛ НАНБ. – Мн., 2001.– 445 с.
111. Возрастная динамика органической массы культур сосны в разных природных зонах / В.А. Усольцев, А.И. Колтунова, М.В. Азаренок и др. // *Научные труды: Сб. Урал. гос. лесотехн. акад. – Екатеринбург, 2000.– С. 36 – 42.*
112. Carbon sequestration by New Zealand's plantation forests / D.V. Hollinger, J.P. Maclaren, P.N. Beets, D.J. Turlan // *N. Z. J. Forest Sci.* – 1993.– Vol. 23, № 2.– P. 194 – 208.
113. Петренко М.М. Запасы углерода в искусственных насаждениях сосны полесья Украины // *Проблемы лесоведения и лесоводства: Сборник научных трудов Института леса НАН Б. – Гомель, 2001. – Вып. 53. – С. 179 – 181.*
114. Колосок О.М. Продуктивність і структура фітомаси штучних лісостанів звичайної в Українських Карпатах: Автореферат дис. ... канд. с./х. наук: 06.03.03. / Киев. – Київ, 2002.– 20 с.
115. Chiba Y. Simulation of CO₂ budget and ecological implications of sugi (*Criptomeria Japonica*) man-made forests in Japan // *Ecol. Modell.*– 1998.– Vol. 111, № 2–3. – P. 269–281.

116. Рихтер И.Э. Роль минеральных удобрений и многолетнего люпина в биологическом круговороте углерода, азота, фосфора и калия культур сосны и ели // Лесоведение и лесное хозяйство..– Мн.: БТИ, 1975. – Вып. 10. – С. 40 – 48.
117. Carbon storage in forest ecosystems of the RESEF Quebec long-term monitoring stations / R. Oument, S. Saint-Lourent, C. Camire, G. Gagnon // Can. Soc. Soil Sci.: Annu. Conf. Abstr., Lethbridge, 7 – 11 July, 1996. – Can. J. Soil Sci. – 1996. – Vol. 76, № 2.– P. 217 – 218.
118. Vedrova E.F. Carbon pools and fluxes of 25-year old coniferous and deciduous stands in Middle Siberia // Boreal Forest and Glob. Change: Pap. Int. Boreal Forests Res. Assoc. Conf., Saskatoon, 25 – 30 Sept. 1994. – Water, Air and Soil Pollut. – 1995. – Vol. 82, № 1–2.– P. 239 – 346.
119. Gatis D.M. Carbon cycling in a north temperate forest // Clim. – Veg: Interact. Proc. Workshop.– Boulder, Colo, 1986.– P. 120 – 121.
120. Выгодская Н.Н., Милюкова И.М. CO₂-ассимиляция хвойных лесов, как компонент газообмена углекислым газом подстилающей поверхности с атмосферой // Вестн. Моск. гос. ун-та. – Сер. 5. География. – 1995. – № 1. – С. 36 – 42.
121. Stakanov V.D., Korotkov I.A. Carbon balance of northern Siberian forest stands // Spatial-Temporal Diment. High-Latitude Ecosystem Change: Abstr. Workshop., Krasnoyarsk, 1 – 7 Sept., 1997. – Krasnoyarsk, 1997.– P. 56 – 57.
122. Ведрова Э.Ф. Углеродный баланс в сосняках красноярской лесостепи // Лесоведение. – 1996.– № 5.– С. 51 – 59.
123. Шугалей Л.С. Распределение органического вещества в сосняках лесостепи Средней Сибири // Лесоведение. – 1998. – № 3. – С. 3 – 11.
124. Кайбияйнен Л.К., Ялынская Е.Е., Софронова Г.И. Баланс углекислого газа в средневозрастном сосняке черничном // Экология.– 1999.– № 4.– С. 271 – 275.
125. The carbon pool in a British semi-natural woodland / G.L. Pate-naude, B.D.J. Briggs, R. Milne e.a. // Forestry: An international journal of forest research. – 2003. – Vol. 76, № 1. – P. 109 – 119.
126. Кобак К.И. Биотические компоненты углеродного цикла.– Л.: Гидрометеиздат, 1998. – 248 с.
127. Бирюкова О.Н., Орлов Д.С. Органические соединения и оксиды углерода в почве и биосфере // Почвоведение. – 2001. – № 2. – С. 180 – 191.
128. Банкаина Т.А., Банкин М.П., Шельпяков А.А. Биосферная функция почв в предотвращении накоплений CO₂ в атмосфере // 2 Съезд общества почвоведов: Тез. докл. – Кн. 1. – М., 1996. – С. 144 – 145.
129. Pekka E.K. What is changing in the global environment // Carring for the forest: Research in a changing world: Congress report, IUFRO XX World

congress, Tampere, Finland, 6 – 12 August, 1995. – Vol. II. – Jyväskylä: IUFRO, 1996. – P. 29 – 34.

130. Maier C.A., Kress L.W. Soil CO₂ evolution and root respiration in 11 year-old loblolly pine (*Pinus taeda*) plantations as affected by moisture and nutrient availability // *Can. J. Forest Res.* – 2000. – Vol. 30, № 3. – P. 347 – 359.

131. Цыкунов И.А. Лесная подстилка и ее роль в биологическом круговороте веществ в лесу // Организация производства товаров народного потребления в лесхозах Белоруссии. Рациональное использование и восстановление лесосырьевых ресурсов: Тез. докл. респ. науч.-практ. конф. молодых ученых. – Гомель, 1972. – С. 40 – 41.

132. Ялынская Е.Е. Оценки источников эмиссии углекислого газа в средневозрастном сосновом фитоценозе // Роль дееств. биоты в современных условиях глоб. изменений окружающей среды: Биот. регуляция окруж. среды: Докл. междунар. семин., г. Петрозаводск, 12 – 16 октября 1998 г. – Гатчина, 1988. – С. 118 – 119.

133. Scglentner R.E., Cleve K.V. Relationships between CO₂ evolution from soil substrate temperature and substrate moisture in four mature forest types in interior Alaska // *Can. J. Forest Res.* – 1985. – Vol. 15, № 1. – P. 97 – 106.

134. Жилкин Б.Д., Рихтер Т.А. Изменение скорости разложения подстилки под влиянием минеральных удобрений и многолетнего люпина // Лесоведение и лесное хозяйство. – Мн.: БТИ, 1975. – Вып. 10. – С. 29 – 34.

135. Робонен Е.В. Содержание СО₂ в почвенном воздухе и эмиссия углекислоты из почв // Эколого-биологическое обоснование гидролесомелиорации и реконструкции лесосушительных систем: Информационные материалы к совещанию, Петрозаводск, 3 – 6 июня 1996 г. / Ин-т леса Карел. Науч. Центра РАН. – Петрозаводск: Институт леса Карельского научного центра РАН, 1996. – С. 48 – 49.

136. Зауральская Л.М. Разложение некоторых растений–торфообразователей в естественных условиях // Взаимоотношение леса и болота. – М.: Наука, 1967. – С. 82 – 88.

137. Остроумов В.Е., Буценко А.Н. Инертность эмиссии углекислого газа почвами в атмосферу // Дыхание почвы. – Пушино: РАН Пуш. науч. центр. Ин-т почвовед. и фотосинтеза, 1993. – С. 101 – 107.

138. Ларионова А.А., Розанова Л.Н. Влияние температуры и влажности почвы на эмиссию СО₂ // Дыхание почвы. – Пушино: РАН Пуш. науч. центр. Ин-т почвовед. и фотосинтеза, 1993. – С. 68 – 75.

139. Макаров Б.Н. Дыхание почвы и состав почвенного воздуха на осушенных торфяно-болотных почвах // Почвоведение. – 1960. – № 2. – С. 56 – 62.

140. Liski J. Variation in soil organic carbon and thickness of soil horizons within a boreal forests stand – Effect of trees and implications for sampling // *Silva fenn.* – 1995. – Vol. 29, № 4. – P. 255 – 266.
141. Модель трансформации органического вещества в почве для количественного изучения функций почвы в экосистемах / В.В. Бугровский, Н.Н. Заленская, А.С. Кержанцев, В.А. Ковда // Информационные проблемы изучения биосферы. – М.: Наука, 1992. – С. 119 – 122.
142. Ведрова Э.Ф., Миндеева Т.Н. Интенсивность продуцирования углекислого газа при разложении лесных подстилок // *Лесоведение.* – 1998. – № 1. – С. 30 – 41.
143. Ведрова Э.Ф. Баланс органического и минерального вещества при разложении лесных подстилок // 2 съезд об-ва почвоведов: Тез. докл., Санкт-Петербург, 27 – 30 июня, 1996. – Кн. 2. – М., 1996. – С. 164.
144. Комисарова И.Ф. Связь выделения CO_2 из почв с компонентами биогеоценоза // *Общ. пробл. биогеоценологии: 2 Всесоюзн. совещ.: Тез. докл., Москва, 11 – 13 нояб. 1986 г. – Т. 1. – М., 1986. – С. 235 – 236.*
145. Кураченко Н.А. Количественная оценка углекислотного баланса почв различного агрегатного состава // 2 съезда об-ва почвоведов: Тез. докл., Санкт-Петербург, 27 – 30 июня, 1996. – Кн. 1. – М., 1996. – С. 184 – 185.
146. Демкина Т.С., Ананьева Н.Д., Орлинский Д.Б. Сравнительная оценка почв по активности продуцирования CO_2 // *Почвоведение.* – 1997. – № 5. – С. 564 – 569.
147. Стенина Т.А. Биологическая активность тундр воркутинской тундры // *Почвоведение.* – 1987. – № 3. – С. 59 – 64.
148. Туев Н.А. Микробиологические процессы гумусообразования. – М.: Агропромиздат, 1983. – 239 с.
149. Rajvanshi R., Gupta S.R. Soil respiration and carbon balance in a tropical *Dalbergia sissoo* forest ecosystem // *Flora.* – 1986. – Vol. 178, № 4. – P. 251 – 260.
150. Шишко А.А., Бамбалов Н.Н. Аккумуляция углерода в почвах сопряженных ландшафтов Беловежской пущи // *Природные ресурсы.* – 1997, № 2. – С. 122 – 125.
151. Роль почвенного покрова в предотвращение накопления CO_2 в атмосфере / Т.А. Банкина, М.П. Банкин, А.А. Шельпяков и др. // *Всерос. науч. конф., посвящ. 70-летию выхода в свет «Биосферы» В. И. Вернадского: Тез. докл., Саратов, 3 – 4 дек. 1996 г. – Саратов, 1996. – С. 92 – 93.*
152. Иванов А.В. Динамика выделения CO_2 из почвы на гарях в сосняках // *Роль науки в создании лесов будущего: Тезисы докладов на Всесоюзной конференции молодых ученых, г. Пущино Московской обл., 5 – 7 мая 1981 г. – Л.: ЛенНИИЛХ, 1981. – С. 20 – 21.*

153. Трофимов С.Я. О динамике органического вещества в почвах // Почвоведение.– 1997.– № 9.– С. 1081 – 1086.
154. Трофимов С.Я., Гончарик Н.Ю. Дорофеева Е.Н. Запасы углерода в ненарушенных почвах Южной Тайги (на примере ЦЛГБЗ) // Почвоведение. – 1997. – № 10. – С. 1211 – 1216.
155. Tagen I. ^{14}C measurements of soil organic matter soil CO_2 and dissolved organic carbon (1987 – 1992) // Radiocarbon. – 1996. – Vol. 38, № 2. – P. 247 – 251.
156. Pradas B., Sinha S.K. Kinetics of carbon mineralization in calcareous soil amended with crop residues and organic manures // J. Indian Soc. Soil Sci.– 1996.– Vol. 44, № 4.– P. 772 – 774.
157. Raich J.W., Nadelhoffer R.J. Belowground carbon allocation in forest ecosystems: global trends // Ecology.– 1989.– Vol. 70, № 5.– P. 1346 – 1354.
158. Crill P.M. Seasonal pattern of methane uptake and carbon dioxide release by a temperate woodland soil // Glob. Biochem. Cycl. – 1991.– Vol. 5, № 4.– P. 319 – 334.
159. Sollins P., Homann P., Caldwell B.A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls // Geoderma. – 1996. – Vol. 74, № 1–2.– P. 65 – 105.
160. Черкинский А.В., Горячкин С.В. Распределение и время обновления углерода почв в субарктических и бореальных экосистемах Европейской части России // Криогенные почвы: влияние криогенеза на процессы и особенности почвообразования: Мат. конф.– Пущино, 1992. – С. 66 – 67.
161. Смагин А.В. Анализ поведения углекислого газа в почве // Вестн. Моск. гос. ун-та. – Сер. 17. Почвоведение.– 1998.– № 4.– С. 28 – 35.
162. Хегай Т.А., Рачинский В.В., Пельтцер А.С. Сорбция двуокиси углерода почвами // Почвоведение.– 1980.– № 1.– С. 62 – 68.
163. Архангельская Г.П. Влияние влажности почвы и температуры среды на интенсивность дыхания почв // Бюл. ВНИЦ агролесомелиорации. – 1968. – Т. 49, № 3. – С. 16 – 19.
164. Dowydenko N. Zawartosc wegla w glebach wybranych drewostanow sosnowych i swierkowich na gruntach porolnych: autoref. pracy doktorskiej... . – Warszawa, grudzien, 2002. – 23 p.
165. Пастернак П.С., Смольянинова И.И. Органическое вещество лесных почв в главнейших типах лесорастительных условий равнинных лесов УССР // Лесоводство и агролесомелиорация. – Выпуск 72: Экология леса. – Киев: Урожай, 1986.– С. 8 – 14.
166. Nessel E. Decomposition rate constants of *Picea abies* logs in south-eastern Norway // Can. J. Forest Res.– 1999.– Vol. 29, № 3.– С. 372 – 381.

167. Leiho R., Prescott C.E. The contribution of coarse woody debris to carbon, nitrogen, and phosphorus cycles in three Rocky Mountain coniferous forests // *Can. J. Forest Res.* – 1999. – Vol. 29, № 10. – P. 1592 – 1603.
168. Harmon M.E., Krankina O.N., Sexton J. Decomposition vectors. A new approach to estimating woody detritus decomposition dynamics // *Can. J. Forest Res.* – 2000. – Vol. 30, № 1. – P. 76 – 84.
169. Смагина М.В. Многолетняя динамика разложения растительных остатков в лесных и лесоболотных биогеоценозах // *Гидролесомелиорация: наука – производству.* – СПб, 1996. – С. 30 – 31.
170. Егорова Р.А. Разложение опада хвои в сосновых биогеоценозах // *Болотные биогеоценозы и их изменение в результате антропогенного воздействия.* – Л.: Наука, 1983. – С. 56 – 81.
171. Krankina O.N., Harmon M.E. Dynamics of the dead wood carbon pool in north-western Russian boreal forests // *Boreal Forest and Glob. Change: Int. Boreal Forests Res. Assoc. Conf., Saskatoon, 25 – 30 Sept. 1994.* – Water, Air and Soil Pollut. – 1995. – Vol. 2, № 1–2. – P. 227 – 238.
172. Cornelissen J.H.C. An experimental comparison of leaf decomposition rates in a wide range of temperate plant species and types // *J. Ecol.* – 1996. – Vol. 84, № 4. – P. 573 – 582.
173. Decomposition process: Modelling approaches and applications / D.L. Moorhead, R.L. Sinsabaugh, A.E. Likins, J.F. Reynolds // *Sci. Total Environ.* – 1996. – Vol. 183, № 1–2. – P. 137 – 149.
174. Smith J.E., Heath L.S. A model of forest floor carbon mass for United States forest types. – Res. Pap. NE–722. – Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station, 2002. – 37 p.
175. David C. Chojnacky L.S. Heath Estimating down deadwood from FIA forest inventory variables in Maine // *Environmental Pollution.* – 2002. – Vol. 116. – P. 25 – 30.
176. Аткин Л.И., Аткина А.С. Особенности накопления подстилок в лесных сообществах // *Почвоведение.* – 2000. – № 8. – С 1004 – 1008.
177. Wyckoff P.H., Clark J.S. Predicting tree mortality from diameter growth. A comparison of maximum likelihood and Bayesian approaches // *Can. J. Forest Res.* – 2000. – Vol. 30, № 1. – P. 156 – 167
178. Сеннов С.Н. Динамика отпада в хвойных и лиственно-хвойных древостоях // *Лесоведение.* – 1995. – № 5. – С. 67 – 72.
179. Загребев В.В., Сеницын С.Г. Древесный отпад: величина, товарная структура, использование // *Лесное хозяйство.* – 1988. – № 11. – С. 33 – 37.
180. Фрей Т., Кулл О. К углеродному балансу ели европейской // *Стабильность и продуктивность лесных экосистем: Тез. докл. Всес. совещ., Тарту, 29 – 31 окт. 1985 г.* – Тарту, 1985. – С. 149 – 150.

181. Hagihara A., Yokota T., Ogawa K. CO₂ exchange rate at level of individual trees of hinoki cypress // 15th Int. Bot. Congr., Yokogama, 28 Aug. – 3 Sept., 1993. – Yokogama, 1993. – P. 262.
182. Блондинский В.К. Исследование СО₂-газообмена сосны обыкновенно в различных типах леса // Газообмен растений в посевах и природных фитоценозах: Тез. докл. раб. совещ., Москва, 17 – 19 марта 1992 г. – М., 1992. – С. 10 – 12.
183. Старостина К.Ф. Фотосинтез лесных трав в субклимаксовых сообществах // Стабильность и продуктивность лесных экосистем: Тез. докл. Всесоюзного совещания, Тарту, 29 – 31 окт. 1985 г. – Тарту, 1985. – С. 131 – 132.
184. Молкина И.С. Газообмен и образование ассимилятов в разновозрастной хвое сосны обыкновенной // Лесоведение. – 1984. – № 6. – С. 29 – 33.
185. Забуга В.Ф., Забуга Г.Н. Фотосинтез хвои разного возраста сосны обыкновенной // Лесоведение. – 1991. – № 1. – С. 20 – 30.
186. Блондинский В.К. Исследование фотосинтеза сосны обыкновенной в малопродуктивных древостоях лишайникового типа леса // Стабильности и продуктивность лесных экосистем: Тез докл. всес. совещ., Тарту, 29 – 31 окт. 1985 г. – Тарту, 1985. – С. 12 – 13.
187. Гирс Г.Н., Стаканов В.Д. Интенсивность фотосинтеза и баланс ФАР в сосняках лесостепной зоны Средней Сибири // Стабильность и продуктивность лесных экосистем: Тез. докл. Всесоюзного совещания, Тарту, 29 – 31 окт. 1985 г. – Тарту, 1985. – С. 28 – 29.
188. Witowski J. Porownanie wizania CO₂ przez ocieniona I nas-tonieczniona czese korony sosny zwyczajnej // Pr. Inst Bad. Les. A. – 1994. – Vol. 782, № 778. – P. 39 – 46.
189. Забуга В.Ф., Забуга Г.А. Эколого-физиологические особенности дыхания ствола сосны обыкновенной // Лесоведение. – 1987. – № 6. – С. 46 – 53.
190. Мамаева В.А. Дыхание корней сосны в разных типах леса // Лесоведение. – 1987. – № 4. – С. 46 – 50.
191. Забуга В.Ф., Забуга Г.А. Оценка общих затрат на дыхание стволов соснового древостоя // Лесоведение. – 1993. – № 1. – С. 60 – 66.
192. Thieron V., Laudelout H. Contribution of root respiration to total CO₂ efflux from the soil of a deciduous forest // Can. J. Forest Res. – 1996. – Vol. 26, № 7. – P. 1142 – 1148.
193. Грязькин А.В., Кухарь В.В., Кухарь О.В. Температурный коэффициент для дыхания стволов ели // Экол. и защита леса. – Л., 1987. – С. 33 – 36.
194. Забуга В.Ф., Забуга Г.А. Дыхание ствола деревьев различных классов роста сосны обыкновенной // Лесоведение. – 1992. – № 1. – С. 59 – 66.

195. Price D.T., Black T.A. Effect of short-term variation in weather on diurnal canopy CO₂ flux and evapotranspiration of a juvenile Douglas-fir stand // *Agr. And Forest Meteorol.* – 1990. – Vol. 5, № 3. – P. 139 – 158.
196. Price D.T., Black T.A. Effects of summertime changes in weather and root-zone soil water storage on canopy CO₂ flux and evapotranspiration of two juvenile Douglas fir stands // *Agr. and Forest Meteorol.* – 1991. – Vol. 53, №4. – P. 303 – 323.
197. Молчанов А.Н. Лес и окружающая среда. – М.: Наука, 1968. – 248 с.
198. Галенко Э.П., Тужилкина В.В., Кузина Е.А. Влияние солнечной радиации на интенсивность фотосинтеза хвои сосны в суточной динамике // *Радиационная климатология и прикладные аспекты актинометрии: Использование актинометрической информации для нужд народного хозяйства: Матер. 12 совещ. по актинометр.* – Иркутск, 1984. – С. 205 – 206.
199. Молчанов А. Г. Сравнение интенсивности фотосинтеза сосны в разных эдафических условиях // *Лесоведение.* – 1993. – № 6. – С. 76 – 80.
200. Блондинский В.К. Временная вариабельность фотосинтеза сосны обыкновенной в различных условиях произрастания // *Экофизиологические исследования древесных растений / РАН: Карельский научный центр Института леса.* – Петрозаводск, 1994. – С.3 – 17.
201. Малкина И.С. Обмен CO₂ молодых деревьев лиственницы // *Лесоведение.* – 1995. – № 5. – С. 59 – 66.
202. Korpilahti E. Photosynthetic production of Scots pine in the nature invironment // *Acta Forest fenn.* – 1987. – № 202. – P. 1 – 7.
203. Jurik T.W., Weber J.A., Gates D.M. Effect of temperature and light on photosynthesis of dominant species of a northern hardwood forest // *Bot. Gaz.* – 1998. – Vol. 149, № 2. – P. 203 – 208.
204. Сергейчик С.А., Сергейчик А.А., Сидорович Е.А. Экологическая физиология хвойных пород Беларуси в техногенной среде. – Мн.: Беларуская навука, 1998. – 199 с.
205. Jarvis P.G., Miranda H.S., Muetzelfeldt R.I. Modellig canopy exchanges of water vapor and carbon dioxide in coniferous forest plantations // *Forst-Atmos. Interact: Proc. Forest. Environ. Meas. conf., Oak Ridge, Tennecy, 23 – 28 Oct. 1983.* – Dordrecht, 1985. – P. 521 – 542.
206. Wang Y. P. Polglase P. J. Carbon balance in the tundra boreal forest and humid tropical forest during climate change: Scaling up from leaf physiology and soil carbon dynamics // *Plant. Cell and Environ.* – 1995. – Vol. 18, № 10. – P. 1226 – 1224.

207. Scott Goetz J. Modeling carbon fluxes, net primary production and light utilization in boreal forest stands: Diss. ... Doctor of Philosophy. – Maryland, 1996. – 24 p.
208. MacDicken A. Guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. – Winrock International Institute, 1997. – 87 p.
209. Kolchugina T.P., Vinson T.S. Carbon sources and sinks in forest biomes of the former Soviet Union // *Global Biochem. Cycles*. – 1993. – Vol. 7, № 2. – P. 291 – 304.
210. Распределение запасов органического углерода в почвах лесов России / О.В. Честных, Д.Г. Замолотчиков, А.И. Уткин, Г.Н. Кокорин // *Лесоведение*. – 1999. – № 2. – С. 13 – 21
211. Уткин А.И., Замолотчиков Д.Г., Сухих В.И. Влияние возрастного критерия лесных насаждений на точность региональных оценок запасов и депонирования углерода в фитомассе лесов // *Экология*. – 1999. – № 4. – С. 243 – 250.
212. Сальников А.А., Усольцев В.А. Новый метод экстраполяции фитомассы древостоев пробных площадей на лесопокрытую площадь лесхоза и систематические ошибки существующих методов // *Леса Урала и х-во в них*. – 1999. – № 19. – С. 219 – 228.
213. Using forest health monitoring data to integrate above and below ground carbon information / B.L. Conkling, C.M. Hoover, W.D. Smith, J.C. Palmer // *Environmental Pollution*. – 2002. – Vol. 116. – P. 221 – 232.
214. Аткин А.С., Аткина Л.И. Способ определения надземной фитомассы сосновых насаждений // *Леса Урала и х-во в них*. – 1999. – № 19. – С. 11 – 16.
215. Усольцев В.А., Колтунова А.И. Оценка запасов углерода в фитомассе лиственных экосистем Северной Евразии // *Экология*. – 2001. – № 4. – С. 258 – 256.
216. Макаревский М.Ф. Запасы и баланс органического углерода в лесных и болотных биогеоценозах Карелии // *Экология*. – 1991. – N 3. – С. 3 – 10.
217. Ялынская Е. Е. Экофизиология дыхания сосны и CO₂-газообмен в сосновом ценозе: Автореф. дис. ... канд. биол. Наук: 03.00.16 / Сыктывкар. – Сыктывкар, 1999. – 23 с.
218. Влияние светотемпературного режима и уровня грунтовых вод на CO₂-газообмен открытого участка олиготрофного болота / В.К. Курец, Е.Н. Икконен, Ю. Алм и др. // *Экология*. – 1998. – №1. – С. 14 – 18.
219. Икконен Е.Н., Толстогузов О.В. Концепция устойчивости CO₂ газообмена болота с атмосферой // *Генезис, эволюция и роль болот в биосферных процессах: Тезисы докладов межд. конф.* – Мн., 1994. – С. 51 – 53.
220. Measurements of turbulent heat and CO₂ exchange over forests from aircraft / R.I. Desjardins, J.L. MacPherson, P. Alvo, P.H. Schuepp // *Forst-At-*

mos. Interact. Proc. Forest. Environ. Meas. conf., Oak Ridge, Tennecy, 23 – 28 Oct. 1983. – Dordrecht, 1985. – P. 645 – 658.

221. Austin L., Shuepp P.H., Desjardins R.L. The feasibility of using airoborne CO₂ flux measurements for the imaging of the rate biomass production // Agr. and Forest Meteorol. – 1987. – Vol. 39, № 1. – P. 13 – 23.

222. Net ecosystem CO² exchange of mixed forest in Belgium over 5 years / A. Carrara, A.S. Kowalski, J. Neiryneck e.a. // Agricultural and Forest Meteorology. – 2003. – Vol. 119, № 3–4. – P. 209–227.

223. Углекислотный газообмен хвойных Предбайкалья / А.С. Шерба-
тюк, Л.В. Русакова, Г.Г. Суворова, Л.С. Янькова. – Новосибирск: Наука.
Сиб. отд-ние, 1991. – 135 с.

224. Карпушкин Л.Т. Определение вертикального углекислотного
профиля в посевах // Фотосинтетические системы высокой продуктивно-
сти. – М.: Наука, 1966. – С. 149 – 156.

225. Гиршович Ю.Е. Разработка методики и аппаратуры для исследо-
вания углекислого газообмена в системе почва – растение – приземный
слой атмосферы: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 11.698 / Ленинград. –
Л, 1970. – 26 с.

226. Кайбияйнен Л.К., Блондинский В.К. Фотосинтетическая фикса-
ция СО₂ и биомасса лесных ценозов. К методике оценки стока СО₂ // Фи-
зиология растений. – 1995. – Т. 42, № 1. – С. 138 – 143.

227. Guenther A., Hewitt C.N. A global model of natural volatile organic
compound emissions // J. Geophys. Res. – 1995. – Vol. 100. – P. 8873–8892.

228. Казанкин А.А. Фитомасса и органический углерод культур
сосны Республики Марий Эл: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.03.02. –
Йошкар-Ола, 2002. – 18 с.

229. Мартынюк З.П., Бобкова К.С., Тужилкина В.В. Оценка баланса
углерода лесного фитоценоза // Физиология растений. – 1998. – Vol. 45,
№ 6. – С. 914 – 918.

230. Кудрявцев В.В. Динамик фитомассы и углерода в лесо-
культурценозах ельников кисличных Тверской области: Автореф. дис. ...
канд. с.-х. наук: 06.03.01. – СПб, 2002. – 21 с.

231. Петренко М.М. Динаміка фітомси та депонованого вуглецю
штучних насаджень сосні Полісся України: дисер. ... канд с./г. наук:
06.03.03. – Київ, 2002. – 133 с.

232. Усольцев В.А. Оценка предельных запасов углерода в
фитомассе елово-пихтовых экосистем Северной Евразии // Экология. –
1998. – № 5. – С. 366 – 375.

233. Хлорофилльный индекс и ежегодный фотосинтетический сток углерода в сфагновых ассоциациях / П.Ю. Воронин, А.В. Максев, И.А. Гукасян и др. // Физиология растений. – 1997. – Т. 44, № 1. – С. 31 – 38.
234. Тужилкина В.В., Бобкова К.С., Мартынюк З.П. Хлорофилльный индекс и ежегодный фотосинтетический сток углерода в хвойные фитоценозы на европейском севере России // Физиология растений. – 1998. – Т. 5, № 4. – С. 594 – 600.
235. Running S.W. Microclimate control of forest productivity: analysis by computer simulation of annual photosynthesis transpiration on balance in different environments // Agr. and Forest Meteorol. – 1984. – Vol. 32, № 3 – 4. – P. 267 – 288.
236. Kajfer-Bogatas L. Photosynthetic model for predicting net willow stand production // Agr. and Forest Meteorol. – 1990. – Vol. 50, № 1–2. – P. 75 – 85.
237. Simulating soil carbon dynamics along a boreal forest transect case study (BFTCS) in central Canada / C. Peng, M.J. Apps, I.A. Nalder, D.T. Price // Can. J. Soil Sci. – 1996. – Vol. 76, № 3. – P. 432.
238. Saugier B. Rôle de la végétation terrestre dans le cycle global du CO₂ // C. r. Acad. agr. Fr. – 1995. – Vol. 81, № 5. – P. 109 – 123.
239. Mohren G.M.J., Goldeijk K.C.G.M. CO2FIX: A dynamic model of the CO₂-fixation in forest stands: De Dorschkamp, Research Institute for Forestry and Urban Ecology. Report 24. – Wageningen, 1990. – 35 p.
240. Zasada M. The growth model for fir (*Abies alba* Mill.) // Folia forestalia polonica. – Series A – Forestry. – 1999. – № 41. – P. 37 – 46.
241. Adapting a patch model to simulate the sensitivity of Central-Canadian boreal ecosystems to climate variability / D.T. Price, D.H. Halliwell, M.J. Apps, C.H. Peng // J. Biogeogr. – 1999. – Vol. 26, №5. – P. 1103 – 1113.
242. Модельный подход к оценке суммарного обменного потока углерода для экосистем европейской территории России / Ю.М. Свиржев, Л.Л. Голубятников, Е.А. Денисенко, В.А. Бровкин // Журнал общей биологии. – 1997. – Т. 58, № 2. – С. 5 – 14.
243. Программа и методика биогеоценотических исследований / Под ред. Н.В. Дылиса. – М.: Наука, 1974. – 404 с.
244. Уткин А.И. Исследования по первичной биологической продуктивности лесов в СССР // Лесоведение. – 1970. – № 3. – С. 58 – 89.
245. Monserud R.A., Marshall J.D. Allometric crown relations in three northern Idaho conifer species // Can J. Forest Res. – 1999. – Vol. 29, № 5. – P. 21 – 535.
246. Применение биологически обусловленных взаимосвязей при формировании банка данных фитомассы лесов / В.А. Усольцев, С.В. Тепкин, И.В. Мельникова, А.А. Сальников и др. // Современные аспекты лес-

ной таксации: Сб. науч. трудов Института леса НАН Б. – Ч. 2. – Гомель, 1994. – Вып. 38. – С. 226 – 228.

247. Короткова С.А. Изменение веса кроны в связи с изменением таксационных показателей деревьев в насаждении // Доклады ТСХА. – 1967. – Вып. 124. – С. 283 – 286.

248. Нестеров В.Г., Бобылев Б.Н. Объемный метод определения веса листовой массы лесонасаждений // Доклады ТСХА. – 1967. – Вып. 124. – С. 293 – 296.

249. Математические модели оценки массы стволов в сосновых древостоях / З.Я. Нагимов, И.В. Шевелина, И.С. Сальникова, Г.В. Анчугова // Научные труды: Сб. Урал. гос. лесотехн. акад. – Екатеринбург, 2000. – С. 19 – 25.

250. Tritton L.M., Valentine H.T., Furnivae G.M. A new procedure for estimation of tree biomass and nutrient content // Colloq. INRA. – 1983. – № 19. – P. 335 – 341.

251. Bormann B.T. Diameter-based biomass repression models ignore large sapwood-related variations in Sitka spruce // Can. J. Forest res. – 1990. – Vol. 20, № 7. – P. 1098 – 1104.

252. Усольцев В.А. Многомерная регрессионная оценка надземной фитомассы березы и осины в колочных лесах Казахстана и Сибири // Лесоведение. – 1985. – № 1. – С. 3 – 12.

253. Аллометрические уравнения для фитомассы по данным деревьев сосны, ели, березы и осины в европейской части России / А.И. Уткин, Д.Г. Замолотчиков, Т.А. Гульбе, Я.И. Гульбе // Лесоведение. – 1996. – № 6. – С. 36 – 46.

254. Определение запасов углерода по таксационным показателям древостоев: метод поучастковой аллометрии / А.И. Уткин, Д.Г. Замолотчиков, Т.А. Гульбе и др. // Лесоведение. – 1998. – № 2. – С. 38 – 54.

255. Замолотчиков Д.Г., Уткин А.И., Коровин Г.Н. Определение запасов углерода по зависимым от возраста насаждений конверсионно-объемным коэффициентам // Лесоведение. – 1998. – С. 84 – 93.

256. Онучин А.А., Спицина Н.Т. Закономерности изменения массы хвои в хвойных древостоях // Лесоведение. – 1995. – № 5. – С. 48 – 58.

257. Аткин А.С., Аткина Л.И. Экспресс-способ определения стволовой массы дерева // Леса Урала и х-во в них. – 1999. – № 19. – С. 3 – 10.

258. Лакида П.І. Фітомасса лісів України. – Тернопіль: Збруч, 2001. – 256 с.

259. Уткин А.И. Основные направления в исследованиях по биологической продуктивности лесных фитоценозов за рубежом // Лесоведение. – 1969. – № 1. – С. 63 – 83.

260. Starr M., Hartman M. Kinnunen T. Biomass functions for mountain birch in the Vuoskojarvi integrated monitoring area // *Boreal Environ. Res.* – 1998. – Vol. 3, № 3. – P. 297 – 303.
261. A quantitative analysis of plant form – the pipe model theory / K. Shinozaki, K. Yoda, K. Hozumi, T. Kira // *Jap. J. Ecol.* . – 1964 . – Vol. 14, № 3. – P. 133 – 139.
262. Кайбияйнен Л.К., Хари П. Сбалансированность системы водного транспорта у сосны обыкновенной. I. Пути движения влаги в ксилеме // *Лесоведение.* – 1985. – № 5. – С. 23 – 28.
263. Усольцев В.А. Биоэкологические аспекты таксации фитомассы деревьев. – Екатеринбург: Уро РАН, 1997. – 216 с.
264. Ковалев Ю.Л. Архитектура дерева // *Знание – сила.* – 1975. – № 11. – С. 36 – 38.
265. Рождественский С.Г., Уткин А.И., Гульбе Я.И. Инвариантные продукционно-морфологические характеристики крон деревьев мелколистных пород // *Лесоведение.* – 1991. – № 1. – С. 31 – 41.
266. Сбалансированность системы водного транспорта у сосны обыкновенной. II. Активная ксилема / П. Хари, Л.К. Кайбияйнен, Т.А. Сазонова, А. Мякеля // *Лесоведение.* – 1985. – № 5. – С. 74 – 77.
267. Усольцев В.А. Формирование банков данных о фитомассе лесов. – Екатеринбург: УрО РАН, 1998. – 563 с.
268. Folliage biomass-sapwood (area and volume) relationships of *Tectona grandis* L.F. and *Gmelina arborea* Roxb.: silvicultural implications / R. Mortaya, G. Galloway, F. Berninger, M. Kanninen // *Forest ecology and management.* – 1999. – Vol. 113, № 2–3. – P. 231 – 239.
269. Berninger F., Nikinmaa E. Implications of varying pipe model relationships on Scots pine growth in different climates // *Functional ecology.* – 1997. – Vol. 11, № 2. – P. 146 – 156.
270. Berninger F., Nikinmaa E. Foliage area-sapwood area relationships of Scots pine (*Pinus sylvestris*) trees in different climates // *Canadian Journal of forest research.* – 1994. – Vol. 24, № 11. – P. 2263 – 2268.
271. Сальников А.А., Усольцев В.А., Сальникова И.С. Оптимизация объема экспериментальных данных при оценке массы крон березы на основе пайп-модели // *Научные труды: Сб. Урал. гос. лесотехн. акад.* – Екатеринбург, 2000. – С. 43 – 51.
272. Chiba Y. Architectural analysis of relationship between biomass and basal area based on pipe model theory // *Ecol. Modell.* – 1998. – Vol. 108, № 1–3. – P. 219–255.
273. Усольцев В.А. Рост и структура фитомассы древостоев. – Новосибирск: Наука, 1988. – 255 с.

274. Полякова Н.Ф. Соотношение между массой листвы, приростом древесины и транспирацией // Доклады академии наук СССР. – 1954. – Т. ХСVI.– № 6.– С. 1261 – 1263.
275. Vedrova E.F. Carbon balance in pine ecosystems of Middle Siberia // High-Latitude Ecosystem Change: Abstr. Workshop Spatial-Temporal Diment., Krasnoyarsk, 1 – 7 Sept., 1997. – Krasnoyarsk, 1997.– P. 58.
276. Геаграфія Беларусі: Энцыклапедычны даведнік. – Мн.: Беларуская энцыклапедыя, 1992. – 258 с.
277. Лебедев А.Н. Климат СССР: Европейская территория СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1959. – Вып. 1. – 367 с.
278. Будыко М.И. Глобальная экология. – М.: Мысль, 1977. – 327 с.
279. Шкляр А.Х. Календарь природы Белоруссии. – Мн.: Высшая школа, 1979. – 264 с.
280. Юркевич И.Д., Ловчий Н.Ф. Леса Белорусского Полесья. – Мн.: Наука и техника, 1974. – 312 с.
281. Ловчий Н.Ф. Экологический анализ структуры и продуктивности сосновых лесов Беларуси. – Мн.: Беларуская навука, 1999. – 263 с.
282. Леса СССР: В 9 т. – Том 2: Подзона Южной тайги и смешанных лесов. – М.: Наука, 1966. – 472 с.
283. Экологическая ситуация в Республике Беларусь: 1992 – 1993 гг.: Справочно-статистический сборник / Под общ. ред. А.А. Матесовича, А.А. Савастенко, А.В. Яковенко. – Мн.: Минприрода, 1994. – 126 с.
284. Анучин Н.П. Лесная таксация.– М.: Лесная промышленность, 1977.– 487 с.
285. Справочник таксатора / В.С. Мирошников, О.А. Труль, В.Е. Ермаков и др.– Минск: Ураджай, 1980.– 359 с.
286. Юркевич И.Д., Ярошевич Э.П. Биологическая продуктивность типов и ассоциаций сосновых лесов.– Мн.: Наука и техника, 1984. – 228 с.
287. Юркевич И.Д., Ловчий Н.Ф. Сосновые леса Белоруссии (типы, ассоциации, продуктивность). – Мн.: Наука и техника, 1984. – 176 с.
288. Степанчик В.В., Тарасенко В.П., Василенко А.И. Техногенное загрязнение Республики Беларусь и его влияние на сосновые насаждения // Проблемы лесоведения и лесоводства: Сб. науч. тр. Институт леса НАН Б. – Ч. 1. – Гомель, 1993. – Вып. 37. – С. 62 – 70.
289. Уткин А.И., Дылис Н.В. Изучение вертикального распределения фитомассы в лесных биогеоценозах // Бюл. МОИП. Отдел биологический.– 1966.– Т. 71, Вып. 6.– С. 79 – 91.

290. Родин Л.Е., Ремезов Н.П., Базилевич Н.И. Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах. – Л.: Наука, 1968. – 142 с.
291. Гришина П.А., Самойлова Е.М. Учет биомассы и химический анализ растений. – М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1971. – 99 с.
292. Валетов В.В. Фитомасса и первичная продукция безлесных и лесных болот. – Ч. 1. – Минск, 1992. – 218 с.
293. Смирнов В.В. Органическая масса в некоторых лесных фитоценозах Европейской части СССР. – М.: Наука, 1971. – 262 с.
294. Козловская Л.С., Медведева В.Н. Пьявченко Н.И. Динамика органического вещества и процесс торфообразования. – Л.: Наука, 1978. – 176 с.
295. Грук П.В. Фитомасса сосновых культур в мшистом и вересковом типах леса // Лесоведение и лесное хозяйство. – Мн.: Высшая школа, 1979. – Вып. 14. – С. 56 – 59.
296. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. – М.: Изд-во Московского ун-та, 1961. – 432 с.
297. Пономарева В.В., Николаева Т.А. Методы изучения органического вещества в торфяно-болотных почвах // Почвоведение. – 1961. – № 5. – С. 89 – 95.
298. Вознесенский В.Л., Заленский О.В., Семихатова О.А. Методы исследования фотосинтеза и дыхания растений. – Л.: Наука, 1965. – 305 с.
299. Методы почвенной микробиологии и биохимии / Под ред. Д.Г. Звягинцева. – М.: Изд-во МГУ, 1991. – 304 с.
300. Инишева Л.И., Дементьева Т.В. Скорость минерализации органического вещества торфов // Почвоведение. – 2000. – № 2. – С. 196 – 203.
301. Турлюн И.А. Новый метод и приборы для исследования газообмена в почвах // Почвоведение. – 1952. – № 1. – С. 72 – 80.
302. Heath L.S., Birdsey R.A., Williams D.W. Methodology for estimating soil carbon for the forest carbon budget model of the United States // Environmental Pollution. – 2002. – Vol. 116. – P. 373 – 380.
303. Examination of validity of tree method for measuring soil respiration / Y. Beck, H. Koizumi, M. Sotoh e. a. // 15th Int. Bot. Congr., Yokogama, 28 Aug. – 3 Sept., 1993 – Yokogama, 1993. – P. 316.
304. Никитин А.Н., Степанчик В.В., Василенко А.И. Изучение интенсивности дыхания компонентов лесной мёртвой массы в различных гидротермических условиях // Почвы и их плодородие на рубеже столетий: Теоретические и прикладные проблемы почвоведения: Материалы II съезда белорусского общества почвоведов, Минск, 26 – 29 июня 2001 г. / Бел НИИ почвоведения и агрохимии. – Мн., 2001. – С. 153 – 155.

305. Никитин А.Н. Методика определения запаса валежа в лесных экосистемах // Лес в жизни восточных славян от Киевской Руси до наших дней: Сб. науч. трудов Института леса НАН Беларуси. – Гомель: ИЛ НАН Беларуси, 2003. – Вып. 57. – С. 87 – 99.

306. Postlethwait J.H., Hopson J.L. The nature of life. – New-York: McGRAW-HILL Publishing Company, 1989. – 854 p.

307. Никитин А.Н., Степанчик В.В. Предварительная оценка роли болотных сосняков в депонировании углерода // Проблемы лесоведения и лесоводства: Сборник научных трудов Института леса Национальной академии наук Беларуси. – Гомель: ИЛ НАН Беларуси, 1999. – Вып. 50. – С. 227-232.

308. Успенский В.В., Мироненко А.В. Моделирование фитомассы крон сосны на основе множественной регрессии // Комплексная продуктивность лесов и организация многоцелевого (многопродуктового) лесопользования: Тезисы Всероссийской конференции, Воронеж, 13 – 14 дек. 1995. – Воронеж, 1996. – С. 38 – 40.

309. Аткин А.С., Стаканов В.Д. Способ определения массы годичного опада в сосняках // Леса Урала и хозяйство в них. – 1999. – № 19. – С. 17 – 20.

310. Рябуха Е.В. Накопление лесной подстилки в насаждениях Украинского Полесья // Лесоведение. – 1972. – № 1. – С. 26 – 34.

311. Никитин А.Н. Особенности горизонтальной структуры живого напочвенного покрова в сосняках // Проблемы лесоведения и лесоводства: Сб. науч. трудов Института леса НАН Беларуси. – Гомель: ИЛ НАН Беларуси, 2000. – Вып. 51. – С. 64 – 67.

312. Никитин А.Н., Валетов В.В. Биопродукционная характеристика напочвенного покрова сосновых лесов территориально сопряженных с г. Гомелем // Материалы XXVI студенческой конференции по естественным, техническим и гуманитарным наукам, Гомель, 10 марта – 30 апреля, 1997 г. / ГГУ им. Ф. Скорины. – Гомель, 1997. – С. 125-126.

313. Валетов В.В., Степанчик В.В., Никитин А.Н. Структура фитомассы напочвенного покрова сосновых лесов территориально сопряженных с г. Гомелем // Проблемы лесоведения и лесоводства: Сб. науч. тр. – Гомель: ИЛ НАНБ, 1997. – Вып. 45. – С. 38-42.

314. Валетов В.В., Никитин А.Н., Степанчик В.В. Продукционная оценка напочвенного покрова сосняков в условиях зеленой зоны г. Гомеля // Лесо-экологические и ботанические исследования юго-востока Беларуси: Сб. ст. / Под ред. В.В. Валетова - Мн., 1997. – С. 6-12.

315. Степанчик В.В., Валетов В.В., Никитин А.Н. Особенности развития подпологовых ярусов лесных биогеоценозов в условиях техногенного загрязнения // Лесо-экологические и ботанические исследования

юго-востока Беларуси: Сб. ст. / Под ред. В.В. Валетова - Мн., 1997.- С. 13-17.

316. Валетов В.В., Никитин А.Н. Фитомасса напочвенного покрова сосняков Беларуси // Лесо-экологические и ботанические исследования юго-востока Беларуси: Сб. ст. / Под ред. В.В. Валетова - Мн., 1997.- С. 18-22.

317. Никитин А.Н. Системная оценка биопродукционного уровня напочвенного покрова сосновых лесов Беларуси // Трэція Рэспубліканская навуковая канферэнцыя студэнтаў Рэспублікі Беларусь: Тэзісы дакладаў у пяці частках, Минск, 14 – 16 мая 1997 г. / БДУ. – Ч. 4. – Мінск: Белдзяржунівесітэт, 1997. – С. 75 – 76.

318. Кивисте А.К. Функции роста леса: учебно-справочное пособие.— Тарту, 1988.— 108 С.

319. Никитин А.Н. Изменение углеродной функции лесных насаждений под влиянием техногенного загрязнения // Сахоровские чтения 2003 года: экологические проблемы XXI века: Материалы международной конференции ведущих специалистов, молодых ученых и студентов, Минск, 19 – 20 мая 2003 г. / Международный государственный экологический университет им. А.Д. Сахарова. – Минск, 2003. – С. 269.

320. Никитин А.Н. Возрастная динамика накопления углерода в стволовой древесине сосняков искусственного происхождения // Леса Евразии в XXI веке: восток – запад: Материалы II международной конференции молодых ученых, посвященной проф. И.К. Пачоскому, Каменюки, 1 – 5 октября 2002 г. / Беловежская пуца. - М.: Изд-во Моск. Гос. ун-та леса, 2002 - С. 52 – 53.

321. Лебков В.Ф., Каплина М.Ф. Углероддепонирующие функции спелости сосняков и ельников Европейского региона России // Лесное хозяйство. – 1995. – № 1. – С. 33 – 35.

322. Никитин А.Н. Накопление углерода в биомассе сосновых культурценозов // Труды БГТУ. Сер. лесн. хоз-во. – 2003. – Вып. XI. – С. 95 – 97.

323. Никитин А.Н., Степанчик В.В., Василенко А.И. Динамика накопления углерода сосновыми биогеоценозами искусственного происхождения // Проблемы лесоведения и лесоводства: Сб. науч. трудов Института леса НАН Беларуси. - Гомель: ИЛ НАНБ, 2003. - Вып. 56. – С 78 - 88.

324. Трейфельд Р.Ф. Определение запасов и фитомассы древесного детрита на основе данных лесоустройства // Лесное хозяйство.— 2000.— № 4.— С. 23 – 26.

325. Шорохова Е.В., Шорохов А.А. Роль древесного детрита в динамике углерода в коренных ельниках подзоны средней тайги // Лес, наука, молодежь: Материалы международной научной конференции молодых

ученых. В 2-х томах, Гомель, 5 – 7 октября, 1999 г. / Институт леса НАН Беларуси. – Том I. – Гомель: Институт леса НАНБ, 1999. – С. 224 – 226.

326. Никитин А.Н. Роль древесного отпада в формировании углеродного баланса лесного биогеоценоза // Проблемы лесоведения и лесоводства: Сб. науч. трудов Института леса НАН Б. - Гомель: ИЛ НАН Беларуси, 2001. - Вып. 52. – С. 75 – 80.

327. Amador J.A., Jones R.D. Response of carbon mineralization to combined changes in soil moisture and carbon-phosphorus ratio in a low phosphorus histosol // Soil Sci. – 1997. – Vol. 162, № 4. – P. 275 – 282.

328. Никитин А.Н. Гидротермическая характеристика выделения углекислого газа почвой // Леса Европейского региона – устойчивое управление и развитие: Материалы докладов Международной научно-технической конференции, Минск, 4 – 6 декабря 2002 г. / БГТУ. - Мн.: БГТУ, 2002.- Ч. 2.- С. 93 – 96.

329. Медведева М.В. Влияние эмиссий Костомукшского ГОКа на биологическую активность лесных почв Карелии // Лесное хозяйство. – 2000. – № 3. – С. 40–42.

330. Василевич В.И. Статистические методы в геоботанике. – Л.: Наука, 1969. – 232 с.

331. Кузьмичев В.В. Закономерности роста древостоев. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1977. – 160 с.

332. Ермаков В.Е., Севастьянов В.Д. Моделирование хода роста чистого соснового древостоя // Лесоведение и лесное хозяйство. – Вып. 14. – Мн.: Высшая школа, 1979. – С. 65 – 69.

333. Гульяев А. Визуальное моделирование в среде MATLAB: учебный курс. – СПб: Питер, 2000. – 432 с.

334. Никитин А.Н. Имитационная модель накопления углерода древесными компонентами сосновых насаждений искусственного происхождения // Мониторинг и оценка состояния растительного покрова: Материалы межд. науч. конф., Минск, 28 – 31 октября / Институт экспериментальной ботаники НАН Беларуси. – Минск, 2003. – С. 78 – 80.

335. Никитин А.Н. Реакция прироста сосны обыкновенной на изменение климатических условий // Биология - наука XXI века: 7-ая Пушкинская школа-конференция молодых ученых: Тез. докл., Пушкино, 14-18 апреля 2003 г. - Пушкино, 2003. - С.200.

336. Вихров В.Е., Протасевич Р.Т. Прирост древесины сосны в связи с условиями обитания и изменениями погоды // Экология древесных растений. – Мн., 1965. – С. 92 – 100.

337. Гуняженко И.В. О влиянии некоторых климатических факторов на прирост сосны обыкновенной // Ботаника. Исследования. – Мн.: Изд. Акад. Наук БССР, 1963. – Вып. 5. – С. 173 – 176.
338. Алексеев А.С. Радиальный прирост деревьев и древостоев в условиях атмосферного загрязнения // Лесоведение. – 1993. – № 4. – С. 66 – 70.
339. Степанчик В.В., Василенко А.И., Никитин А.Н. Методологические аспекты учета прироста сосновых лесов и его потерь по итогам лесного мониторинга // Леса Беларуси и их рациональное использование: Мат. междунар. науч.- практ. конф., Минск, 29 – 30 ноября 2000 г. / БГТУ. – Мн.: БГТУ, 2000. – С. 24 – 27.
340. The Container Tree Nursery Manual. Vol. 3. Atmospheric environment / T.D. Landis, R.W. Tinus, S.E. McDonald, J.P. Barnett, – Washington, Agric. Handbk., 1992. – 145 p.
341. Dahlman, R.C. CO₂ and plants – revisited. – Vegetatio. – 1993. – Vol. 104. – P. 339 – 355.
342. Карев Г.П., Скоморовский Ю.И. Математические модели изреживания древостоев // Лесоведение. – 1997. – № 4. – С. 14 – 20.
343. Вагин В.А. Моделирование естественного изреживания ельников Московской области // Лесоведение. – 1997. – № 4. – С. 21 – 28.
344. Никитин А.Н. Моделирование древесного отпада в сосновых древостоях искусственного происхождения // Лес в жизни восточных славян от Киевской Руси до наших дней: Сб. науч. трудов Института леса НАН Беларуси. – Гомель: ИЛ НАН Беларуси, 2003. – Вып. 57. – С. 70 – 73.
345. Björklund L. Identifying heartwood-rich stands or stems of *Pinus sylvestris* by using inventory data // *Silva fennica*. – 1999. – Vol. 33, № 2. – P. 119 – 129.
346. Ильинский В.В. Биомасса сосны в насаждениях различных бонитетов // Лесное хозяйство. – 1968. – № 3. – С. 34.
347. Ревин А.И., Смольянов А.Н., Бугаев В.А. Фитомасса хвойных культур в Самарской области // Комплексная продуктивность лесов и организация многоцелевого (многопродуктового) лесопользования: Тезисы Всероссийской конференции, Воронеж, 13 – 14 дек. 1995 г. / ВГЛТА. – Воронеж, 1996. – С. 60 – 64.
348. Нормативные материалы для таксации леса Белорусской ССР. – М.: Госкомлес СССР, 1984. – 308 с.
349. Переход А.Н. Влияние густоты посадок на запас стволовой древесины сосновых культур // Современные аспекты лесной таксации: Сборник научных трудов: Сб. науч. трудов Института леса НАН Беларуси. – Ч. 2. – Гомель, 1994. – Вып. 38. – С. 143 – 145.

350. Переход А.В., Чуешков О.В., Ропот В.Г. Влияние различных режимов выращивания на продуктивность и качество сосновых культур // Проблемы лесоведения и лесоволства: Сб. науч. трудов Института леса НАН Беларуси. – Ч. 1. – Гомель, 1993. – Вып. 37. – С. 102 – 109.

351. Detection of anthropogenic climate change using a fingerprint method / K. Hasselmann, L. Bengtsson, U. Cubasch e. a. // Modern Dynamical meteorology: Symposium in Honour of Aksel Wiin-Nielsen. – Hamburg: ECMWF, 1995. – P. 203–221.

352. Multi-fingerprint detection and attribution of greenhouse gas and aerosol forced climate Change / G.C. Hegerl, K. Hasselmann, U. Cubasch e.a. // Climate Dyn. – 1997. – Vol. 13. – P. 613–634.

353. Швиденко А.З., Страхов В.В., Нильссон С. К оценке продуктивности лесов России // Лесное хозяйство. – 2000. – № 1. – С. 5 – 9.

354. Техногенное загрязнение лесных экосистем Беларуси / Е.Г. Бусько, Е.А. Сидорович, Ж.Л. Рупасова и др. – Мн.: Наука и техника, 1995. – 319 с.

355. Никитин А.Н. Падение углероддепонирующей функции сосняков в связи с загрязнением атмосферного воздуха // Экология 2000: Эстафета поколений: I Международная межвузовская школа - семинар по экологии: Тез. докл. науч. конф., Москва, 17 – 27 апреля 2000 г. / МГУЛ. – М.: МГУЛ, 2000 г. – С. 80–81.

356. Никитин А.Н. Влияние техногенного загрязнения воздуха на углероддепонирующую функцию сосновых насаждений // Лес, наука, молодежь: Материалы международной научной конференции молодых ученых. В 2-х томах, Гомель, 5 – 7 октября, 1999 г. / Институт леса НАН Беларуси. – Т. 1. – Гомель, 1999. – С. 30 –32.

357. Kenneth E. S., Geraldine A. N. Carbon cycling through wood products: the role of wood and paper products in carbon sequestration // Forest products journal. – 1998. – Vol. 48, №. 7–8. – P. 75 – 83.

ТАКСАЦИОННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОБНЫХ ОБЪЕКТОВ

Таблица П.1.1

Таксационная характеристика древостоев пробных площадей

Пробная площадь	Возраст, лет	Состав	Бонитет	Полнота	Средние		Тип леса	Запас, м ³ /га	Средний прирост, м ³ /га
					d, см	h, м			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
u-1	15	10С	I	1,2	9	8,7	Мш.	120	6,5
u-2	21	10С	I ^a	0,81	10,3	10,1	Мш.	107	15,1
u-3	22	10С	I	1,01	9,6	9,7	Мш.	120	11,5
u-4	19	10С	II	1,18	8,5	8,4	Мш.	120	8,7
u-5	35	10С	I ^a	1,02	16,1	17,2	Мш.	271	12,4
u-6	29	10С	I	1,25	13,5	13,1	Мш.	231	10,6
u-7	27	10С	II	0,74	12,2	11,6	Мш.	103	10,1
u-8	40	10С	I ^a	1,15	18,4	19,2	Мш.	362	9,4
u-9	44	10С	I	0,9	18,2	17,8	Мш.	252	10,8
u-10	35	10С	II	1,1	14,5	12,6	Мш.	193	8,3
u-11	51	10С	I ^a	0,8	21,8	22,3	Мш.	354	12,8
u-12	52	10С	I	1,05	20,8	19,3	Мш.	336	10,2

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 1

Продолжение табл. П.1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
u-13	48	10С	II	1	18,3	16,4	Мш.	254	9,0
u-14	60	10С	I ^a	0,95	25,6	25,7	Черн.	461	9,9
u-15	60	10С	I	0,95	24	21,9	Мш.	366	9,0
u-16	61	10С	II	0,74	21,3	19,1	Мш.	231	9,5
u-17	68	10С+Б	I ^a	0,9	28,9	27,8	Орл.	501	9,1
u-18	71	10С	I	0,65	26,7	24,3	Мш.	290	8,9
u-19	75	10С	II	0,9	25,1	21,2	Черн.	343	6,5
u-20	79	10С	I ^a	0,65	31,8	30,3	Орл.	405	7,1
u-21	80	10С+Б	I	0,75	29,5	26,1	Черн.	377	6,9
u-22	84	10С	II	0,8	27,3	23,4	Мш.	344	5,0
u-23	90	10С+Б	I ^a	0,71	35	32	Мш.	485	4,8
u-24	89	10С	I	0,7	32,2	27,6	Черн.	388	4,9
u-25	86	10С	II	0,65	27,5	23,6	Мш.	274	5,2
g-1	70	10С	I	0,94	21,3	24	Мш.	410	7,6
g-2	70	10С	I	1,15	24,1	25,7	Орл.	544,5	10,7
g-3	70	10С	I	0,77	14,6	17,3	Орл.	374,7	9,3

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 1

Продолжение табл. П.1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
g-4	72	10C	I	0,98	26,3	27,2	Черн.	499,2	6,7
g-5	41	10C	I	0,99	13,2	16,8	Мш.	271,6	11,2
g-6	41	10C	I	1,13	15,3	17,4	Мш.	321,7	11,7
g-7	40	10C	I	0,81	14	18,6	Мш.	245,8	11,6
g-8	35	10C	I	1,11	11,9	16,3	Мш.	293,6	10,9
g-9	39	10C	I	1,28	12,3	15,4	Мш.	316	12,4
g-10	55	10C	II	0,9	20,8	18	Мш.	269	1,8
g-11	64	10C	II	0,83	24,4	21,2	Мш.	306,7	7,4
g-12	37	10C	I ^a	0,88	14,8	17,6	Мш.	255	9,5
g-13	61	10C	I ^a	0,86	26,4	29	Мш.	474,9	10,4
g-14	52	10C	I ^a	1,23	21,4	25,3	Мш.	524,9	12,1
g-15	56	10C	I ^a	0,9	20,7	18,0	Мш.	268	2,0
g-16	64	10C	I ^a	1,0	20,4	20,6	Мш.	355	9,6
g-17	72	10C	I	1,0	22,3	22,5	Черн.	490	6,2
g-18	84	10C	I ^a	0,4	38,4	31,4	Мш.	268	3,8
g-19	37	10C	I ^a	0,9	14,8	17,6	Мш.	254	7,2

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 1

Продолжение табл. П.1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
m-1	48	10C	I	1,22	18,5	21,3	Мш.	449	10,3
m-2	53	10C	I ^a	0,96	19,1	23,2	Мш.	397	7,8
m-3	61	10C	II	1,01	19,4	20,5	Мш.	353	5,3
m-4	40	10C	II	1,46	10,9	14,2	Мш.	323	6,8
m-5	42	10C	I ^a	1,0	18,5	20,9	Мш.	361	17,1
m-6	42	10C	I ^a	0,7	17,3	20,6	Мш.	249	10,7
m-7	42	10C	I ^a	1,0	16,1	20,1	Мш.	339	17,3
m-8	42	10C	I ^a	0,9	18,3	20,9	Мш.	329	17,2
m-9	43	10C	I	0,9	15,2	19,2	Мш.	293	8,8
m-10	35	10C	I ^a	1,3	15,8	17,8	Мш.	395	13,7
m-11	42	10C	I ^a	0,8	16,2	20,2	Мш.	271	8,5
s-1	68	10C	I	1,0	22,6	23,3	Мш.	401	4,1
s-2	64	10C	II	0,7	18,9	21,3	Мш.	276	9,6
s-3	53	10C	I	0,6	22,2	22,6	Мш.	267	6,3
s-4	53	10C	I	0,7	17,6	19,7	Мш.	255	9,3

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 1

Продолжение табл. П.1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
s-5	58	10C	I	1,0	20,1	21,4	Мш.	366	2,1
s-6	58	10C	I	0,8	20,5	22,1	Мш.	327	7,9
s-7	44	10C	I	0,9	17,1	19,7	Мш.	311	8,6
s-8	32	10C	I	1,3	11,6	14,4	Мш.	297	8,9

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

АГРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЧВ ПРОБНЫХ ОБЪЕКТОВ

Таблица П.2.1

Агрохимические показатели верхнего 20-сантиметрового слоя почвы пробных объектов

Код пробной площади	Гумус, %	рН в КСl	Содержание, мг/100 г почвы			Валовые, %		
			Н легкогидролизуемый	P ₂ O ₅ подвижный	K ₂ O обменный	N	P	K
1	2	3	4	5	6	7	8	9
u-6	0,9	3,5	2,5	9,4	1,7	0,03	0,05	0,02
u-9	1,0	3,6	2,7	10,2	2,0	0,04	0,04	0,03
u-10	0,9	3,9	3,1	10,1	1,2	0,04	0,03	0,03
u-12	1,2	4,5	2,1	9,7	1,4	0,05	0,03	0,02
u-13	1,7	3,9	1,9	9,1	1,9	0,04	0,04	0,03
u-16	1,1	3,7	1,9	10,4	1,4	0,05	0,04	0,03
u-18	1,9	3,7	2,2	9,5	2,1	0,04	0,02	0,04
u-20	1,6	4,1	4,6	12,8	4,3	0,05	0,04	0,07
u-21	2,0	3,7	7,2	12,9	3,3	0,03	0,05	0,05
g-1	1,8	3,7	3,0	11,9	1,8	0,04	0,04	0,03

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 2

Продолжение табл. П.2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
g-2	2,1	4,1	4,2	12,1	2,4	0,04	0,03	0,04
g-3	1,7	4,9	7,1	11,2	2,7	0,08	0,06	0,05
g-4	2,5	3,1	6,2	12,4	3,1	0,05	0,05	0,06
g-5	1,5	4,2	3,5	10,3	1,7	0,04	0,04	0,03
g-7	1,7	3,9	2,1	10,5	1,2	0,03	0,04	0,01
g-8	1,6	3,5	2,6	11,3	1,4	0,03	0,05	0,02
g-9	1,3	3,6	2,8	12,5	1,9	0,04	0,05	0,03
g-12	1,9	4,5	3,1	14,4	2,5	0,04	0,06	0,05
g-13	1,3	3,5	3,5	10,7	1,9	0,06	0,04	0,04
g-14	0,7	4,6	4,2	12,6	3,6	0,05	0,05	0,06
g-16	0,6	3,7	2,3	10,4	1,8	0,03	0,03	0,03
g-17	3,5	2,9	4,2	12,6	4,6	0,05	0,04	0,08

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

ЗАВИСИМОСТЬ МАССЫ УГЛЕРОДА В ФРАКЦИЯХ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ ОТ ИХ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Таблица П.3.1

Зависимость запаса углерода (кг) в фракциях сосны обыкновенной, произрастающей в Полесско-Приднепровском геоботаническом округе, от диаметра на высоте груди и высоты ствола

Диаметр, см	Высота, м													
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
	Древесина ствола													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2	0,05	0,11	0,17	0,24	0,30	0,37	0,45							
4	0,18	0,40	0,63	0,88	1,14	1,40	1,67							
6	0,39	0,86	1,37	1,91	2,46	3,03	3,62	4,22						
8	0,67	1,49	2,37	3,30	4,26	5,25	6,26	7,30	8,35					
10	1,03	2,28	3,63	5,04	6,51	8,03	9,58	11,16	12,77					
12	1,46	3,22	5,13	7,14	9,21	11,36	13,55	15,79	18,08					
14	1,95	4,32	6,88	9,57	12,36	15,23	18,17	21,18	24,24					
16	2,52	5,57	8,87	12,34	15,94	19,64	23,44	27,31	31,26	35,27	39,35	43,47		

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 3

Продолжение табл. П.3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
18			11,10	15,44	19,94	24,58	29,33	34,18	39,12	44,14	49,24	54,40	59,63	
20			13,57	18,87	24,37	30,04	35,84	41,77	47,81	53,95	60,17	66,49	72,87	79,34
22					29,22	36,01	42,97	50,08	57,32	64,68	72,15	79,71	87,37	95,12
24						42,50	50,72	59,11	67,65	76,33	85,15	94,08	103,12	112,26
26						49,50	59,07	68,84	78,79	88,90	99,16	109,57	120,09	130,74
28						57,00	68,02	79,27	90,73	102,37	114,19	126,17	138,29	150,55
30							77,57	90,40	103,46	116,74	130,22	143,88	157,71	171,69
32									116,99	132,01	147,25	162,69	178,33	194,14
34										148,16	165,27	182,60	200,15	217,89
36										165,20	184,27	203,59	223,16	242,94
Кора ствола														
2	0,02	0,03	0,04	0,06	0,07	0,08	0,09							
4	0,06	0,10	0,14	0,17	0,21	0,24	0,27							
6	0,11	0,20	0,27	0,34	0,40	0,46	0,52	0,58						
8	0,18	0,31	0,43	0,54	0,64	0,74	0,84	0,93	1,02					
10	0,26	0,45	0,62	0,78	0,93	1,07	1,21	1,34	1,47					

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 3

Продолжение табл. П.3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
12	0,36	0,61	0,84	1,05	1,26	1,45	1,63	1,81	1,99					
14	0,46	0,79	1,08	1,36	1,62	1,86	2,10	2,34	2,56					
16	0,57	0,98	1,35	1,69	2,01	2,32	2,62	2,91	3,19	3,46	3,73	3,99		
18	0,69	1,19	1,64	2,05	2,44	2,82	3,18	3,53	3,87	4,20	4,53	4,85	5,16	
20			1,95	2,44	2,90	3,35	3,78	4,20	4,60	5,00	5,38	5,76	6,13	6,50
22			2,28	2,85	3,40	3,92	4,42	4,91	5,38	5,84	6,29	6,74	7,17	7,60
24					3,92	4,52	5,10	5,66	6,21	6,74	7,26	7,77	8,27	8,77
26						5,15	5,81	6,45	7,08	7,69	8,28	8,86	9,44	10,00
28						5,82	6,57	7,29	7,99	8,68	9,35	10,01	10,66	11,29
30						6,52	7,35	8,16	8,95	9,72	10,47	11,21	11,94	12,65
32								9,08	9,95	10,81	11,65	12,47	13,27	14,06
34								10,03	11,00	11,94	12,86	13,77	14,66	15,54
36										13,12	14,13	15,13	16,10	17,06
Ветви														
2	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00							
4	0,16	0,08	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02							

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 3

Продолжение табл. П.3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
6	0,64	0,31	0,20	0,15	0,12	0,10	0,08							
8	1,75	0,84	0,55	0,41	0,32	0,26	0,23	0,20						
10	3,80	1,83	1,20	0,88	0,70	0,58	0,49	0,43	0,38					
12	7,17	3,46	2,26	1,67	1,32	1,09	0,92	0,80	0,71					
14	12,26	5,91	3,86	2,85	2,25	1,86	1,58	1,37	1,21	1,09	0,98	0,90		
16	19,52	9,41	6,14	4,54	3,59	2,96	2,52	2,19	1,93	1,73	1,56	1,43	1,31	
18	29,42	14,18	9,25	6,83	5,40	4,46	3,79	3,29	2,91	2,60	2,36	2,15	1,98	1,83
20			13,35	9,86	7,80	6,44	5,47	4,75	4,20	3,76	3,40	3,10	2,85	2,64
22			18,61	13,75	10,87	8,97	7,63	6,63	5,85	5,24	4,74	4,32	3,97	3,68
24					14,71	12,14	10,32	8,97	7,92	7,09	6,41	5,85	5,38	4,98
26					19,44	16,05	13,64	11,85	10,47	9,37	8,48	7,73	7,11	6,58
28						20,77	17,66	15,34	13,55	12,13	10,97	10,01	9,20	8,51
30						26,41	22,45	19,51	17,23	15,42	13,95	12,73	11,70	10,82
32						33,06	28,11	24,42	21,57	19,31	17,46	15,94	14,65	13,55
34									26,64	23,85	21,57	19,68	18,09	16,73

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 3

Продолжение табл. П.3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
36										29,10	26,32	24,02	22,07	20,42
Хвоя														
2	0,10	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00							
4	0,86	0,26	0,13	0,08	0,05	0,04	0,03							
6	2,98	0,91	0,45	0,28	0,19	0,14	0,11	0,08						
8	7,19	2,19	1,09	0,67	0,46	0,33	0,26	0,20	0,17					
10	14,22	4,34	2,16	1,32	0,90	0,66	0,51	0,40	0,33					
12	24,85	7,58	3,78	2,31	1,58	1,15	0,89	0,70	0,58					
14	39,82	12,14	6,06	3,70	2,53	1,85	1,42	1,13	0,92					
16	59,91	18,27	9,12	5,57	3,80	2,78	2,13	1,70	1,39	1,16	0,98	0,85		
18	85,90	26,19	13,07	7,99	5,45	3,99	3,06	2,43	1,99	1,66	1,41	1,22	1,06	
20			18,05	11,02	7,52	5,50	4,23	3,36	2,75	2,29	1,95	1,68	1,46	1,29
22			24,16	14,75	10,07	7,37	5,66	4,50	3,68	3,07	2,61	2,25	1,96	1,72
24					13,14	9,61	7,38	5,87	4,80	4,01	3,40	2,93	2,55	2,25
26					16,78	12,28	9,43	7,50	6,13	5,12	4,35	3,74	3,26	2,87

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 3

Продолжение табл. П.3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
28							11,83	9,41	7,69	6,42	5,45	4,70	4,09	3,61
30								11,62	9,50	7,93	6,73	5,80	5,06	4,45
32										9,66	8,20	7,07	6,16	5,43
34										11,63	9,87	8,51	7,42	6,53
36												10,13	8,83	7,78

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 3

Таблица П.3.2

Зависимость запаса углерода (кг) в фракциях сосны обыкновенной, произрастающей в Полесско-Приднепровском геоботаническом округе, от диаметра на высоте груди и возраста дерева

Диаметр , см	Возраст, лет								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Древесина ствола									
2	0,21	0,26	0,29	0,32					
4	0,98	1,21	1,37	1,49	1,59				
6	2,43	2,99	3,37	3,68	3,93	4,15			
8	4,61	5,67	6,40	6,97	7,46	7,87	8,24		
10	7,57	9,31	10,51	11,46	12,25	12,94	13,55	14,10	
12	11,36	13,97	15,78	17,19	18,38	19,41	20,33	21,16	21,92
14	16,00	19,69	22,23	24,23	25,90	27,36	28,65	29,82	30,89
16	21,54	26,51	29,93	32,62	34,87	36,82	38,56	40,13	41,57
18	28,00	34,45	38,90	42,39	45,32	47,86	50,12	52,16	54,04
20	35,40	43,56	49,18	53,60	57,30	60,51	63,37	65,95	68,32

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 3

Продолжение табл. П.3.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
22		53,85	60,80	66,26	70,84	74,81	78,34	81,53	84,46
24			73,79	80,42	85,98	90,80	95,08	98,96	102,51
26				96,11	102,74	108,50	113,62	118,25	122,50
28				113,34	121,17	127,96	134,00	139,46	144,46
30					141,28	149,20	156,24	162,61	168,44
32					163,10	172,24	180,37	187,73	194,46
34						197,13	206,43	214,85	222,55
36							234,44	243,99	252,74
Кора ствола									
2	0,00	0,01	0,01	0,02					
4	0,01	0,03	0,05	0,07	0,10				
6	0,03	0,07	0,12	0,18	0,25	0,32			
8	0,05	0,14	0,24	0,35	0,48	0,62	0,76		
10	0,09	0,23	0,39	0,59	0,79	1,02	1,26	1,51	
12	0,13	0,34	0,60	0,88	1,20	1,54	1,90	2,28	2,68

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 3

Продолжение табл. П.3.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
14	0,19	0,49	0,85	1,25	1,70	2,18	2,69	3,23	3,80
16	0,25	0,66	1,14	1,69	2,30	2,95	3,64	4,37	5,14
18	0,33	0,86	1,49	2,21	3,00	3,85	4,76	5,71	6,71
20	0,42	1,09	1,89	2,81	3,81	4,89	6,04	7,25	8,51
22		1,35	2,35	3,48	4,73	6,07	7,49	8,99	10,56
24			2,86	4,24	5,75	7,38	9,12	10,95	12,86
26				5,08	6,90	8,85	10,93	13,12	15,41
28				6,01	8,15	10,46	12,92	15,51	18,22
30					9,53	12,23	15,10	18,13	21,30
32					11,03	14,15	17,48	20,98	24,65
34					12,65	16,24	20,05	24,06	28,27
36						18,48	22,81	27,39	32,17
Ветви									
2	0,00	0,00	0,00	0,00					
4	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01				

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 3

Продолжение табл. П.3.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	0,12	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02			
8	0,32	0,15	0,10	0,07	0,06	0,05	0,04		
10	0,70	0,34	0,22	0,16	0,13	0,11	0,09	0,08	
12	1,32	0,63	0,41	0,31	0,24	0,20	0,17	0,15	0,13
14	2,25	1,09	0,71	0,52	0,41	0,34	0,29	0,25	0,22
16	3,59	1,73	1,13	0,83	0,66	0,54	0,46	0,40	0,35
18	5,40	2,60	1,70	1,26	0,99	0,82	0,70	0,61	0,53
20	7,80	3,76	2,45	1,81	1,43	1,18	1,01	0,87	0,77
22		5,24	3,42	2,52	2,00	1,65	1,40	1,22	1,07
24			4,63	3,42	2,70	2,23	1,90	1,65	1,46
26				4,52	3,57	2,95	2,51	2,18	1,92
28				5,85	4,62	3,81	3,24	2,82	2,49
30					5,88	4,85	4,12	3,58	3,17
32					7,36	6,07	5,16	4,49	3,96
34						7,50	6,38	5,54	4,89

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 3

Продолжение табл. П.3.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
36						9,15	7,78	6,76	5,97
Хвоя									
2	0,01	0,00	0,00	0,00					
4	0,05	0,02	0,01	0,01	0,00				
6	0,19	0,06	0,03	0,02	0,01	0,01			
8	0,46	0,14	0,07	0,04	0,03	0,02	0,02		
10	0,90	0,28	0,14	0,08	0,06	0,04	0,03	0,03	
12	1,58	0,48	0,24	0,15	0,10	0,07	0,06	0,04	0,04
14	2,53	0,77	0,38	0,23	0,16	0,12	0,09	0,07	0,06
16	3,80	1,16	0,58	0,35	0,24	0,18	0,14	0,11	0,09
18	5,45	1,66	0,83	0,51	0,35	0,25	0,19	0,15	0,13
20	7,52	2,29	1,14	0,70	0,48	0,35	0,27	0,21	0,17
22		3,07	1,53	0,94	0,64	0,47	0,36	0,29	0,23
24			2,00	1,22	0,83	0,61	0,47	0,37	0,30
26				1,56	1,06	0,78	0,60	0,48	0,39

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 3

Продолжение табл. П.3.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
28				1,96	1,34	0,98	0,75	0,60	0,49
30					1,65	1,21	0,93	0,74	0,60
32					2,01	1,47	1,13	0,90	0,73
34						1,77	1,36	1,08	0,88
36						2,11	1,62	1,29	1,05

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 3

Таблица П.3.3

Зависимость запаса углерода (кг) в фракциях подпологовой древесной растительности, от диаметра на высоте 0,5 м

Вид	Фрак- ция	Диаметр, см											
		1	2	3	4	6	8	10	12	14	16	20	24
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Рябина	С. ¹	0,000	0,214	0,508	0,937	2,223	4,102	6,597	9,727	13,507	17,949	28,868	
	Л. ²	0,006	0,020	0,046	0,083	0,198	0,366	0,591	0,875	1,219	1,625	2,628	
	К. ³	0,018	0,080	0,191	0,355	0,852	1,588	2,573	3,818	5,330	7,117	11,536	
Крушина ломкая	С.	0,000	0,234	0,583	1,109	2,746	5,221	8,594	12,912	18,217	24,545		
	Л.	0,007	0,028	0,067	0,126	0,311	0,591	0,973	1,463	2,065	2,783		
	К.	0,017	0,081	0,202	0,386	0,959	1,828	3,018	4,544	6,423	8,668		
Береза бо- родав- чатая	С.	0,067	0,176	0,312	0,467	0,827	1,240	1,698	2,195	2,727	3,291	4,507	5,827
	Л.	0,024	0,058	0,098	0,141	0,236	0,340	0,451	0,569	0,693	0,821	1,091	1,376
	К.	0,019	0,047	0,080	0,116	0,199	0,291	0,391	0,498	0,610	0,728	0,978	1,245
Лещина обык- новенная	С.	0,089	0,198	0,537	1,266	4,611	11,798	24,564	44,784	74,450	115,660		
	Л.	0,081	0,179	0,485	1,142	4,158	10,638	22,148	40,379	67,128	104,284		
	К.	0,004	0,041	0,164	0,437	1,747	4,667	10,002	18,645	31,568	49,812		
Дуб че- реш- чатый	С.	0,000	0,268	0,687	1,338	3,421	6,660	11,166	17,030	24,335	33,151	55,575	84,763
	Л.	0,000	0,010	0,200	0,418	1,066	2,070	3,463	5,271	7,520	10,229	17,107	26,040
	К.	0,000	0,024	0,124	0,547	0,978	1,919	3,234	4,953	7,101	9,701	16,338	25,012

Примечания:

1. С. – стволлик.
2. Л. – листья.
3. К. – корни.

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 3

Продолжение табл. П.3.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Клен остро- листный	С.	0,033	0,179	0,508	1,074	3,092	6,556	11,746	18,917	28,304	40,128	71,912	115,827
	Л.	0,005	0,015	0,032	0,057	0,129	0,233	0,369	0,538	0,740	0,976	1,550	2,263
	К.	0,011	0,060	0,174	0,369	1,071	2,283	4,106	6,635	9,955	14,148	25,456	41,136
Граб обык- новенный	С.	0,061	0,214	0,444	0,744	1,539	2,578	3,846	5,333	7,031	8,932	13,326	18,476
	Л.	0,008	0,024	0,045	0,069	0,130	0,202	0,285	0,377	0,478	0,587	0,827	1,095
	К.	0,183	0,628	1,293	2,159	4,447	7,425	11,050	15,293	20,127	25,535	38,004	52,594
Ясень обык- новенный	С.	0,000	0,000	0,501	0,966	2,432	4,680	7,774	11,770	16,712	22,642	37,609	56,932
	Л.	0,022	0,041	0,060	0,078	0,113	0,146	0,180	0,212	0,244	0,276	0,339	0,400
	К.	0,000	0,000	0,216	0,423	1,083	2,113	3,546	5,414	7,742	10,554	17,714	27,043
Бересклет Бородав- чатый	С.	0,048	0,326	1,022	2,308	7,284	16,471	31,018					
	Л.	0,013	0,071	0,193	0,396	1,087	2,229	3,890					
	К.	0,013	0,078	0,236	0,518	1,576	3,470	6,401					

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

ЗАПАСЫ УГЛЕРОДА В КОМПОНЕНТАХ СОСНОВОГО БИОГЕОЦЕ-
НОЗА

Таблица П.4.1

Запасы органического углерода в минеральных горизонтах почвы сосня-
ков искусственного происхождения

Код проб- ной площа- ди	Запас углерода в слое почвы 0 – 10 см., т·га ⁻⁴	Запас углерода в слое почвы 10 – 50 см., т·га ⁻⁴	Запас углерода в минеральных го- ризонтах почвы, т·га ⁻⁴
g–1	7,82	3,43	11,25
g–2	4,21	3,32	10,78
g–3	6,22	4,56	7,53
g–4	6,82	4,88	11,70
g–5	4,26	3,15	7,42
g–6	5,42	3,75	9,17
g–7	6,42	2,23	8,64
g–8	6,99	3,72	10,71
g–9	9,84	6,61	16,45
g–10	6,99	3,46	10,45
g–11	9,14	5,15	14,29
g–12	8,22	5,82	14,04
g–13	5,53	3,38	8,91
g–14	7,69	4,24	11,93

Таблица П.4.2

Запасы углерода в лесной подстилке в лесных сосновых биогеоценозах
искусственного происхождения

Код пробной площади	Масса подстилки, т·га ⁻⁴	Масса углерода в лесной подстилке, т·га ⁻⁴
1	2	3
u-1	25,60	10,34
u-2	31,30	12,65
u-3	22,12	8,93
u-4	19,32	7,81
u-5	42,15	17,03
u-6	18,45	7,45
u-7	17,00	6,87
u-8	38,56	15,58
u-9	31,56	12,75
u-10	17,42	7,04
u-11	34,02	13,74
u-12	30,54	12,34
u-13	20,01	8,08
u-14	39,87	16,11
u-15	29,31	11,84
u-16	19,04	7,69
u-17	90,58	36,59
u-18	35,90	14,50
u-19	20,52	8,29
u-20	41,50	16,77
u-21	24,30	9,82
u-22	24,21	9,78
u-23	42,16	17,03
u-24	39,66	16,02

Продолжение табл. П.4.2

1	2	3
u-25	22,10	8,93
g-1	22,10	8,93
g-2	50,77	20,51
g-3	39,35	15,90
g-4	22,10	8,93
g-5	44,04	17,79
g-6	43,00	17,37
g-7	51,29	20,72
g-8	32,49	13,13
g-9	34,39	13,89
g-10	74,08	29,93
g-11	38,47	15,54
g-12	53,55	21,63
g-13	88,78	35,87
g-14	46,32	18,71

Таблица П.4.3

Запасы биомассы и углерода в живом напочвенном покрове (т·га⁻¹)

Код пробной площади	Биомасса							Запас углерода						
	Сумма	Мхи	Злаки	Кустар- нички	Папо- рот- ники	Хвощи	Раз- нотра- вье	Сумма	Мхи	Злаки	Кустар- нички	Папо- рот- ники	Хвощи	Раз- нотра- вье
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
u-1	0,05	0,05						0,03	0,03					
u-2	0,51	0,50		0,01				0,27	0,26		0,01			
u-3	0,56	0,54	0,01	0,01				0,29	0,28	0,01	0,01			
u-4	0,48	0,48						0,25	0,25					
u-5	0,45	0,42	0,02		0,01			0,23	0,22	0,01				
u-6	0,31	0,31						0,16	0,16					
u-7	0,62	0,60		0,01			0,01	0,32	0,31		0,01			
u-8	0,55	0,54					0,01	0,29	0,28					
u-9	0,71	0,64	0,02	0,02			0,03	0,37	0,33	0,01	0,01			0,01
u-10	0,60	0,58	0,02					0,31	0,30	0,01				
u-11	0,62	0,51	0,03	0,02	0,01		0,05	0,32	0,27	0,02	0,01			0,02
u-12	0,75	0,71	0,02	0,02				0,39	0,37	0,01	0,01			

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 4

Продолжение табл. П.4.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
u-13	0,56	0,51	0,03	0,02				0,29	0,27	0,02	0,01			
u-14	0,78	0,58	0,03	0,06	0,01		0,10	0,40	0,30	0,02	0,03			0,05
u-15	0,65	0,46	0,06	0,05	0,02		0,06	0,33	0,24	0,03	0,03	0,01		0,03
u-16	0,87	0,51	0,15	0,03	0,05	0,01	0,12	0,44	0,27	0,08	0,02	0,02		0,05
u-17	0,52	0,11	0,10	0,06	0,04		0,21	0,25	0,06	0,05	0,03	0,02		0,10
u-18	0,89	0,59	0,21	0,01			0,08	0,45	0,31	0,11	0,01			0,04
u-19	0,90	0,79	0,06	0,02			0,03	0,47	0,41	0,03	0,01			0,01
u-20	0,68	0,20	0,21	0,06	0,06		0,15	0,34	0,10	0,11	0,03	0,03		0,07
u-21	0,76	0,36	0,18	0,12			0,10	0,38	0,19	0,09	0,06			0,05
u-22	0,74	0,51	0,12				0,11	0,38	0,27	0,06				0,05
u-23	0,91	0,50	0,21	0,01	0,05		0,14	0,46	0,26	0,11	0,01	0,02		0,06
u-24	0,93	0,41	0,26	0,05			0,21	0,47	0,21	0,13	0,03			0,10
u-25	1,12	0,38	0,31	0,01	0,08		0,34	0,55	0,20	0,16	0,01	0,04		0,15
g-1	1,97	1,90	0,06				0,01	1,03	0,99	0,03				
g-2	0,48	0,21	0,13		0,03	0,11		0,24	0,11	0,07		0,01	0,05	
g-3	0,25	0,17	0,08				0,01	0,13	0,09	0,04				
g-4	2,25	2,22		0,03				1,17	1,16		0,01			

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 4

Продолжение табл. П.4.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
g-5	1,18	1,18						0,62	0,62					
g-6	1,49	1,49						0,78	0,78					
g-7	0,22	0,18	0,01	0,02	0,01		0,08	0,15	0,10	0,01	0,01			0,04
g-8	4,52	4,52						2,36	2,36					
g-9	1,62	1,62						0,85	0,85					
g-10	0,44	0,36	0,01		0,07		0,05	0,25	0,19	0,01		0,03		0,02
g-11	0,47	0,41	0,02		0,04			0,24	0,22	0,01		0,02		
g-12	0,27	0,22	0,05				0,05	0,16	0,11	0,02				0,02

Таблица П.4.4

Запасы углерода в подпологовой древесной растительности сосняков
искусственного происхождения

Код пробной площади	Запас биомассы, т/ га	Запас углерода, т/ га
u-1	0,52	0,26
u-2	0,30	0,15
u-3	0,27	0,14
u-4	0,25	0,12
u-5	1,19	0,59
u-6	0,27	0,14
u-7	0,30	0,15
u-8	1,85	0,92
u-9	2,61	1,30
u-10	0,52	0,26
u-11	5,29	2,63
u-12	4,69	2,33
u-13	2,19	1,09
u-14	9,07	4,52
u-15	7,36	3,66
u-16	6,18	3,08
u-17	10,62	5,29
u-18	12,20	6,08
u-19	13,36	6,65
u-20	17,56	8,75
u-21	17,02	8,48
u-22	14,18	7,06
u-23	24,16	12,03
u-24	19,49	9,71
u-25	19,38	9,65

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 4

Таблица П.4.5

Запасы углерода в древостое и величина поступления его в отпад на пробных площадях

Пробная площадь	Возраст, лет	Запас углерода в биомассе, т·га ⁻¹					Запас углерода в деревьях отпада, т·га ⁻¹ ·год ⁻¹			
		Древе- сина ствола	кора ствола	ветви	хвоя	корни	Древе- сина ствола	кора ствола	ветви	корни
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
g-1	67	79383	5453	9131	3796	22921	2126	111	153	362
g-1	68	79913	5440	9445	3929	23078	1737	105	139	389
g-1	69	79625	5374	8493	3156	23018	2252	114	105	373
g-1	70	81305	5442	8687	3183	23480	468	23	19	77
g-1	71	82713	5491	9274	3504	23862	662	39	21	144
g-2	65	103727	7180	12947	5303	31143				
g-2	66	102174	7005	12982	5219	30712	3874	245	338	898
g-2	67	103633	7033	13238	5021	31266	2876	170	231	603
g-2	68	104311	7016	13957	5355	31459	1993	132	147	521
g-2	69	106410	7099	13057	4562	32004	0	0	0	0

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 4

Продолжение табл. П.4.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
g-2	70	103496	6847	12974	4505	31102	5122	359	370	1571
g-2	71	106088	6961	13822	4848	31823	0	0	0	0
g-4	64	84613	5845	11290	4263	26242				
g-4	65	84280	5770	11395	4252	26086	1813	134	226	559
g-4	66	84738	5750	10536	3483	26202	1377	88	129	332
g-4	67	85953	5781	11140	3737	26546	854	51	35	186
g-4	68	86802	5792	10919	3528	26727	489	30	22	112
g-4	69	87487	5785	11442	3711	26940	1617	101	58	388
g-4	70	89381	5864	12279	4097	27447	0	0	0	0
g-4	71	91185	5934	12620	4130	27948	290	18	9	68
g-4	72	91531	5909	12504	3945	28010	1286	80	83	320
g-4	73	92753	5941	12471	3818	28332	655	40	22	163
g-5	28	36144	2153	3716	2881	21056	0	0	0	0
g-5	29	38733	2349	3926	3040	21788	444	21	54	389
g-5	30	40845	2506	1897	603	22511	0	0	0	0
g-5	31	42055	2639	1782	563	22067	1514	72	68	1358

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 4

Продолжение табл. П.4.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
g-5	32	44423	2822	1882	593	22786	79	4	3	73
g-5	33	47704	3086	2069	658	23610	340	15	0	327
g-5	34	49415	3221	2028	631	24135	0	0	0	0
g-5	35	51377	3388	1817	545	24532	397	20	4	310
g-5	36	53396	3558	1931	585	25007	212	10	0	178
g-5	37	53194	3600	1870	562	24095	2253	124	30	1502
g-5	38	53053	3647	1928	578	23232	2485	144	27	1528
g-5	39	54803	3797	1966	581	23648	131	7	0	103
g-5	40	55827	3905	1858	538	23639	802	45	13	501
g-5	41	56604	3997	1850	543	23566	1411	93	16	648
g-6	28	23945	2957	2962	1610	7704				
g-6	29	25885	3084	3054	1674	8357	853	138	125	387
g-6	30	28310	3269	3797	2066	9137	0	0	0	0
g-6	31	28024	3136	3516	1897	9090	2629	330	453	890
g-6	32	29713	3237	3628	1942	9634	367	42	49	95
g-6	33	32379	3438	3867	2068	10506	0	0	0	0

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 4

Продолжение табл. П.4.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
g-6	34	34454	3576	4060	2155	11147	0	0	0	0
g-6	35	36346	3686	3975	2051	11761	887	23	145	8
g-6	36	38101	3784	4029	2073	12310	562	19	81	18
g-6	37	39706	3867	4099	2074	12812	471	27	51	37
g-6	38	41433	3956	4242	2190	13401	781	40	84	36
g-6	39	42834	4021	4292	2169	13807	359	22	34	37
g-6	40	44607	4121	4368	2120	14312	0	0	0	0
g-8	27	39404	5188	6141	3144	12397				
g-8	28	42431	5371	6180	3223	13337	992	58	200	103
g-8	29	45596	5575	6883	2725	14268	639	5	145	0
g-8	30	48607	5729	6863	2917	15248	1888	105	324	149
g-8	31	51191	5854	6797	2944	15985	1269	54	238	98
g-8	32	54238	6020	6672	2901	16914	1518	38	270	14
g-8	33	56170	6068	6697	3052	17502	1983	153	267	343
g-8	34	57501	6066	6570	2996	17843	1839	164	247	430
g-8	35	58502	6018	6407	2899	18229	2500	212	286	425

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 4

Продолжение табл. П.4.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
g-8	36	58968	5937	6398	2960	18340	2383	256	267	732
g-10	50	75510	5993	8510	3716	24559				
g-10	51	76847	6032	8749	3788	24880	289	25	28	85
g-10	52	79892	6196	9457	3970	25840	279	23	26	76
g-10	53	81600	6259	10218	4388	26308	593	63	55	265
g-10	54	83917	6366	10273	4197	26993	302	24	16	81
g-10	55	86529	6494	10775	4324	27759	0	0	0	0
g-10	56	88983	6610	11041	4305	28462	0	0	0	0
g-11	53	54423	4213	6129	2756	17009				
g-11	54	54969	4200	6337	2771	17247	1930	155	192	545
g-11	55	56837	4295	7122	3108	17794	0	0	0	0
g-11	56	59339	4434	7530	3215	18568	0	0	0	0
g-11	57	60944	4504	8003	3422	19104	853	46	46	125
g-11	58	63180	4620	8223	3382	19778	0	0	0	0
g-11	59	65871	4764	9084	3786	20653	381	17	19	39
g-11	60	67392	4829	8971	3565	21059	0	0	0	0

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 4

Продолжение табл. П.4.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
g-11	61	70104	4973	9310	3571	21893	0	0	0	0
g-11	62	72748	5110	10396	4145	22692	0	0	0	0
g-13	42	47989	4243	4856	2399	15832				
g-13	43	50099	4366	5130	2501	16473	0	0	0	0
g-13	44	51152	4398	5281	2393	16744	274	19	25	45
g-13	45	52505	4452	5223	2247	17157	505	31	44	62
g-13	46	53665	4494	5302	2231	17434	0	0	0	0
g-13	47	53371	4412	4951	1941	17299	1322	115	73	354
g-13	48	54378	4444	4973	1899	17518	0	0	0	0
g-13	49	53313	4304	4849	1815	17125	1746	163	85	572
g-13	50	52926	4226	4722	1711	16901	939	101	67	397
g-13	51	52037	4109	4607	1653	16572	1601	134	80	466
g-13	52	53894	4208	5532	2257	17111	0	0	0	0
g-13	53	55339	4274	6102	2602	17501	0	0	0	0
g-13	54	57039	4359	6223	2581	17977	0	0	0	0
g-13	55	58380	4417	6342	2577	18325	0	0	0	0

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 4

Продолжение табл. П.4.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
g-13	56	59671	4469	6251	2398	18655	0	0	0	0
g-14	48	81851	6636	9119	4008	26965				
g-14	49	84150	6743	9494	4127	27604	0	0	0	0
g-14	50	87688	6940	10650	4536	28710	0	0	0	0
g-14	51	89723	7014	11401	4892	29345	941	78	54	254
g-14	52	92840	7174	11714	4826	30289	0	0	0	0
g-14	53	95257	7281	11792	4640	30966	0	0	0	0
g-14	54	97293	7355	11859	4473	31555	595	49	33	172
g-15	42	55329	4899	5540	2763	18213				
g-15	43	57639	5030	5842	2876	18907	0	0	0	0
g-15	44	58351	5026	5851	2626	19033	477	49	50	161
g-15	45	56994	4838	5074	2028	18592	2428	221	174	673
g-15	46	57643	4837	4735	1718	18655	0	0	0	0
g-15	47	59880	4960	5501	2249	19320	0	0	0	0
g-15	48	58736	4805	5842	2515	18883	1933	196	99	715
g-15	49	57214	4620	5508	2206	18380	2531	242	147	852

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 4

Продолжение табл. П.4.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
g-15	50	58616	4680	5828	2362	18741	0	0	0	0
g-15	51	59166	4670	5852	2332	18872	818	56	41	158
g-15	52	61378	4789	6601	2784	19528	0	0	0	0
g-15	53	63198	4877	7170	3109	20036	0	0	0	0
g-15	54	64609	4933	7103	2923	20435	352	18	19	44
g-15	55	65885	4981	6886	2668	20742	0	0	0	0
g-15	56	67079	5022	6588	2399	21019	0	0	0	0
g-16	53	51943	4100	5269	2738	15270				
g-16	54	54473	4249	5590	2862	16019	0	0	0	0
g-16	55	56686	4372	5929	2920	16654	0	0	0	0
g-16	56	59329	4525	6295	3066	17434	0	0	0	0
g-16	57	61764	4660	6665	3222	18139	0	0	0	0
g-16	58	63551	4744	6748	3136	18664	535	33	27	100
g-16	59	66391	4902	7413	3530	19574	722	30	38	65
g-16	60	67841	4961	7442	3432	19971	448	22	20	59
g-16	61	71011	5140	7809	3504	20917	0	0	0	0

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 4

Продолжение табл. П.4.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
g-16	62	73739	5285	8600	3966	21707	0	0	0	0
g-16	63	76368	5421	8782	3877	22462	0	0	0	0
g-16	64	78809	5540	9248	4029	23201	590	31	27	95
g-16	65	80303	5594	9195	3832	23621	715	41	39	136
g-17	64	89425	6207	11504	4534	27360				
g-17	65	90223	6207	11754	4580	27546	907	59	81	217
g-17	66	89663	6111	10471	3531	27393	2639	165	234	607
g-17	67	90434	6108	11027	3770	27620	1420	82	59	288
g-17	68	91050	6101	10684	3488	27726	692	42	23	152
g-17	69	91539	6080	11148	3670	27871	1821	113	76	433
g-17	70	92981	6127	11917	4033	28236	345	23	21	94
g-17	71	95032	6213	12249	4067	28789	0	0	0	0
g-17	72	95022	6165	12089	3898	28705	1394	98	113	434
g-17	73	96882	6238	12131	3799	29192	0	0	0	0
g-19	32	60164	6576	6208	3514	19286				
g-19	33	62241	6645	6313	3580	19869	851	57	113	58

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 4

Продолжение табл. П.4.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
g-19	34	65078	6769	6794	3393	20887	1951	149	243	228
g-19	35	67782	6895	7163	3763	21754	1086	87	118	148
m-1	36	66988	6566	6342	3432	22377				
m-1	37	69031	6647	6553	3517	22968	702	68	78	167
m-1	38	71790	6798	6909	3382	23752	0	0	0	0
m-1	39	74448	6939	7141	3436	24491	0	0	0	0
m-1	40	76043	6980	7098	3263	24862	449	55	26	180
m-1	41	79140	7152	7680	3641	25789	235	17	18	36
m-1	42	79884	7108	7879	3766	25979	1665	155	132	436
m-1	43	80723	7082	7422	3250	26141	1105	104	84	307
m-1	44	82805	7160	7995	3639	26767	988	82	62	220
m-1	45	83915	7157	8304	3823	27046	1187	106	81	315
m-1	46	85393	7185	8368	3743	27465	1215	106	96	320
m-1	47	87805	7292	8951	4064	28158	440	38	30	116
m-1	48	90397	7417	9201	4093	28865	0	0	0	0
m-1	49	92784	7520	9417	4096	29534	354	24	19	62

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 4

Продолжение табл. П.4.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m-1	50	96110	7696	10174	4482	30512	0	0	0	0
m-2	41	58916	5390	5651	3088	18558				
m-2	42	61752	5562	5962	3224	19401	0	0	0	0
m-2	43	64791	5747	6574	3381	20313	0	0	0	0
m-2	44	67700	5918	6885	3482	21175	0	0	0	0
m-2	45	70119	6042	7075	3467	21886	325	25	19	66
m-2	46	73048	6208	7419	3591	22744	0	0	0	0
m-2	47	74111	6211	7565	3608	23080	1599	130	84	379
m-2	48	75973	6289	7323	3222	23544	0	0	0	0
m-2	49	78291	6398	7736	3446	24243	657	41	38	102
m-2	50	79555	6423	7961	3542	24572	822	59	45	169
m-2	51	77690	6188	7676	3285	24107	4399	340	290	1063
m-2	52	78702	6198	7897	3366	24331	834	80	75	300
m-2	53	75820	5890	7976	3439	23578	5397	431	382	1445
m-2	54	76549	5880	8125	3442	23766	1179	89	76	294
m-2	55	79072	6008	8466	3535	24490	0	0	0	0

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 4

Продолжение табл. П.4.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m-3	49	61227	5042	6247	3255	18330				
m-3	50	62088	5052	6356	3287	18560	895	48	73	105
m-3	51	64360	5173	6077	2629	19196	0	0	0	0
m-3	52	65754	5224	6490	2914	19566	621	52	39	178
m-3	53	67360	5293	6382	2705	19961	0	0	0	0
m-3	54	69322	5383	6980	3070	20532	687	56	28	196
m-3	55	70259	5395	7329	3297	20842	1581	90	121	255
m-3	56	71433	5430	6804	2762	21118	298	11	17	19
m-3	57	73848	5555	7266	3005	21791	0	0	0	0
m-3	58	74508	5546	7650	3261	21988	1496	89	74	270
m-3	59	74837	5510	7719	3253	22198	2822	154	162	444
m-3	60	74857	5457	8174	3545	22201	2343	171	99	645
m-3	61	77269	5578	8524	3653	22877	0	0	0	0
m-3	62	79185	5664	8572	3539	23379	0	0	0	0
m-3	63	81568	5781	8822	3582	24038	0	0	0	0
m-4	27	37500	5331	8137	3895	10487				

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 4

Продолжение табл. П.4.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m-4	28	40324	5491	7738	3884	11168	1841	7	561	0
m-4	29	43961	5744	8540	2498	12147	0	0	0	0
m-4	30	47217	5950	8744	2683	12989	0	0	0	0
m-4	31	50224	6118	8603	2595	13755	959	2	202	0
m-4	32	55028	6477	9052	3132	15110	0	0	0	0
m-4	33	59224	6755	9086	3521	16289	1510	4	333	0
m-4	34	62120	6891	8865	3155	17062	926	32	138	2
m-4	35	62595	6726	8219	3210	17465	6945	452	975	794
m-4	36	63410	6647	8101	3309	17658	3067	255	342	621
m-4	37	66977	6851	8088	3357	18741	1662	65	212	53
m-4	38	71366	7143	8442	3828	19972	765	0	132	0
m-4	39	68990	6766	7998	3591	19253	5969	600	671	1707
m-4	40	72099	6939	8027	3400	20072	0	0	0	0
m-4	41	75664	7142	8150	3510	21145	1229	36	142	10
m-5	33	18781	2012	1889	1085	5963				
m-5	34	19495	2040	1935	1108	6182	370	38	43	83

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 4

Продолжение табл. П.4.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m-5	35	20551	2103	2098	1071	6503	210	6	30	0
m-5	36	20289	2032	2096	1095	6417	1134	141	108	416
m-5	37	20928	2052	2087	1084	6652	595	35	65	35
m-5	38	21300	2046	2044	1040	6798	746	57	70	108
m-5	39	22214	2099	2110	1061	7056	0	0	0	0
m-5	40	23135	2150	2200	1087	7320	0	0	0	0
m-5	41	24101	2205	2293	1117	7597	0	0	0	0
m-5	30	38278	4201	3635	1990	13486				
m-5	31	42051	4499	3977	2153	14796	0	0	0	0
m-5	32	46332	4836	5450	3420	16299	0	0	0	0
m-5	33	49820	5081	5884	3621	17519	365	50	50	138
m-5	34	52773	5272	5960	3438	18504	207	15	28	18
m-5	35	56075	5491	6253	3455	19618	194	11	25	6
m-5	36	59137	5687	6625	3580	20602	0	0	0	0
m-5	39	68134	6216	6886	3297	23565				
m-5	40	70682	6351	7243	3423	24326	0	0	0	0

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 4

Продолжение табл. П.4.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m-5	41	73689	6522	8221	3822	25262	0	0	0	0
m-6	30	32976	3716	3316	1856	11086				
m-6	31	35753	3923	3554	1979	11997	0	0	0	0
m-6	32	38453	4118	4379	2461	12867	0	0	0	0
m-6	33	41028	4285	4681	2651	13747	499	55	46	127
m-6	34	43388	4438	4856	2655	14474	0	0	0	0
m-6	35	45811	4593	4953	2565	15219	0	0	0	0
m-6	36	48341	4753	5247	2705	15999	0	0	0	0
m-6	39	54699	5087	5455	2803	18037				
m-6	40	55905	5114	5624	2853	18388	707	65	71	169
m-6	41	58475	5265	6187	2877	19166	0	0	0	0
m-8	27	45983	5716	5434	2928	15632				
m-8	28	50773	6097	5799	3136	17217	0	0	0	0
m-8	29	56062	6519	7369	4000	18989	0	0	0	0
m-8	30	60222	6797	7659	4104	20350	539	50	85	114
m-8	31	64270	7054	7754	4015	21666	852	39	137	41

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 4

Продолжение табл. П.4.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m-8	32	68331	7308	7955	4117	23003	998	38	159	22
m-8	33	71190	7431	8011	4033	23927	1194	91	148	146
m-8	34	71957	7338	7848	3851	24169	2760	296	307	782
m-8	35	73353	7311	7906	3927	24682	2584	235	269	534
m-8	36	75205	7336	7960	3942	25358	2108	153	225	256
m-8	37	78062	7473	8149	3966	26282	856	48	94	39
m-8	38	79455	7468	8279	3993	26728	1749	169	162	433
m-8	39	81734	7557	8350	3869	27390	591	45	52	89
m-8	40	82182	7476	8273	3705	27449	1795	214	150	693
m-9	34	51958	5495	5693	3179	16081				
m-9	35	53372	5521	5738	3212	16459	1046	72	134	126
m-9	36	54331	5486	5897	2792	16833	3067	266	384	655
m-9	37	56208	5557	5939	2940	17406	1538	57	207	61
m-10	26	61747	7520	6473	3456	22633				
m-10	27	64539	7643	6593	3543	23382	627	16	136	0
m-10	28	68473	7888	7529	3681	24604	472	13	93	0

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 4

Продолжение табл. П.4.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m-10	29	70422	7899	7595	3776	25128	1346	128	193	239
m-10	30	73106	7974	7628	3814	26050	1910	159	284	243
m-10	31	75501	8039	7994	4159	26808	1319	149	147	310
m-10	32	78366	8175	8026	3986	27610	212	16	28	18
m-10	33	82196	8398	8526	4253	28812	275	27	28	53
m-10	34	85691	8576	9175	4753	29946	832	76	87	145
s-1	60	78849	5749	8912	4088	23334				
s-1	61	80250	5793	9191	4153	23756	1136	64	84	194
s-1	63	82701	5856	9730	4271	24474				
s-1	64	81944	5751	9741	4233	24207	2462	172	277	681
s-1	65	78006	5412	8690	3383	23272	7333	443	589	1538
s-1	66	79159	5440	9569	3887	23632	1587	105	100	397
s-1	67	81116	5525	10122	4115	24199	651	45	53	181
s-1	68	83006	5607	9861	3818	24699	0	0	0	0
s-1	69	82177	5508	10049	3854	24376	2875	223	241	1055
s-1	70	78426	5199	10320	3996	23484	7184	419	449	1553

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 4

Продолжение табл. П.4.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
s-2	56	45778	3503	4830	2472	13145				
s-2	57	47705	3612	5073	2562	13721	304	10	23	18
s-2	59	50391	3732	5482	2674	14573				
s-2	60	51740	3794	5679	2741	14941	294	15	24	50
s-2	61	53457	3881	5634	2477	15430	248	11	20	34
s-2	62	55264	3972	6116	2756	15968	466	22	22	67
s-2	63	57254	4075	6531	2952	16551	299	16	18	53
s-2	64	58675	4138	6524	2826	16939	260	15	13	51
s-2	65	59941	4188	6691	2830	17315	914	59	56	220
s-2	66	61653	4269	6972	2921	17781	69	0	6	0
s-3	45	50189	4234	5306	2456	16653				
s-3	46	51834	4317	5545	2539	17122	0	0	0	0
s-3	48	52423	4256	5773	2566	17230				
s-3	49	52670	4224	5887	2580	17258	1093	119	149	464
s-3	50	49475	3915	5873	2534	16225	3866	402	511	1558
s-3	51	50114	3914	6330	2774	16442	1195	112	94	412

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 4

Продолжение табл. П.4.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
s-3	52	52465	4050	6968	3087	17188	0	0	0	0
s-3	53	54037	4126	7010	2976	17641	0	0	0	0
s-3	54	55824	4216	7007	2802	18174	0	0	0	0
s-3	55	57575	4303	7407	2947	18688	0	0	0	0
s-4	45	62661	5502	6471	3618	17918				
s-4	46	65018	5620	6672	3695	18703	1687	106	174	275
s-4	48	69567	5836	7079	3828	20267				
s-4	49	70490	5830	7159	3816	20703	2875	155	246	329
s-4	50	71292	5816	7155	3384	21099	2920	162	240	362
s-4	51	71962	5788	7538	3705	21493	3557	227	220	612
s-5	50	79244	6413	8190	4097	24236				
s-5	51	80844	6464	8432	4169	24694	989	66	82	184
s-5	53	82174	6416	8752	4208	25102	0	0	0	0
s-5	54	81648	6306	8775	4176	24890	2113	159	199	534
s-6	50	58559	4713	6314	3033	18092				
s-6	51	59756	4750	6508	3082	18463	893	56	75	147

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ 4

Продолжение табл. П.4.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
s-6	53	61469	4769	6854	3139	19045				
s-6	54	62327	4783	7010	3174	19288	881	48	74	132
s-6	55	62816	4767	6757	2742	19465	1653	104	145	321
s-6	56	63678	4779	7152	2963	19733	1138	77	48	243
s-6	57	66084	4907	7810	3294	20449	0	0	0	0
s-6	58	67398	4955	7913	3252	20809	400	23	20	65
s-6	59	69438	5054	7980	3148	21387	0	0	0	0
s-6	60	71342	5143	8441	3338	21916	0	0	0	0
s-7	36	57288	5684	5612	3088	18554				
s-7	37	59727	5806	5792	3164	19379	1082	67	125	85
s-7	39	62994	5902	6113	3271	20409				
s-7	40	63213	5819	6149	3250	20490	2242	223	250	642
s-7	41	64788	5871	6391	3088	20932	759	77	84	234
s-7	42	63840	5685	6444	3160	20701	3392	332	274	990
s-7	43	64691	5673	6794	3393	20957	1683	183	167	622
s-7	44	64818	5605	6554	3095	20923	1383	143	116	470

