

ТУКТАМЫШЕВ ИЛЬШАТ РИНАТОВИЧ

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ДРЕВЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА
НЕИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПАХОТНЫХ ЗЕМЛЯХ В ШИРОКОЛИСТВЕННО-ЛЕСНОЙ И
ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНАХ БАШКИРСКОГО ПРЕДУРАЛЬЯ**

1.5.15 – Экология (Биологические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

УФА – 2024

Работа выполнена в лаборатории геоботаники и растительных ресурсов обособленного структурного подразделения Уфимского института биологии Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук

Научный руководитель

Федоров Николай Иванович

доктор биологических наук, доцент

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Социально-экономический кризис, поразивший сельское хозяйство России в начале 1990-х годов, привёл к тому, что многие пастбища, пашни и сенокосы перестали использоваться (Люри и др 2010; Prishchepov et al., 2012b; Kalinina et al., 2018, 2019). Республика Башкортостан (РБ), по размерам залежных площадей с естественным лесовозобновлением занимает первое место по России (Глушков и др., 2019). В 2019 г. в РБ древесной растительностью были покрыты значительные площади залежей, в том числе неиспользуемых более 20 лет – около 1 млн га, более 8 лет – 3.3 млн га (Глушков и др., 2019). За 25–30 лет на многих залежах сформировались полноценные лесные насаждения. Видовое разнообразие деревьев на заброшенных пашнях зависит, главным образом, от наличия семенных источников, состава пород близлежащих лесных насаждений, плодородия почв и режима их использования до и после прекращения распашки (Boydak., 2004; Широких и др., 2017; Crouzeilles et al., 2020; Kohler et al., 2020). В Башкирском Предуралье наиболее часто в качестве основных лесообразующих пород на залежах выступают *Betula pendula* Roth. и *Pinus sylvestris* L. (Широких и др., 2017). Последствия постагрогенной сукцессии на сельскохозяйственных землях РБ не получили должной оценки ни с экологической, ни с хозяйственной точки зрения. Это обусловлено тем, что до сих пор до конца не установлены реальные масштабы зарастания сельскохозяйственных земель и характеристики формирующихся на этих землях лесных насаждений (Люри и др., 2010). Большая часть зарастающих древесными видами заброшенных земель уже не может быть использована в сельском хозяйстве в ближайшем будущем, но некоторые из них пригодны для лесного хозяйства, плантационного лесоводства, защитных лесонасаждений и т.д. (Cramer et al., 2008; Meiners et al., 2009; Люри и др., 2010). Одним из положительных моментов лесовосстановления на залежных землях является секвестрация углерода в фитомассе древесных видов и почве, особенно на этапе формирования древостоя (Smith et al., 2007; Vuichard et al., 2009; Рыжова и др., 2015). Таким образом, изучение древесной растительности на залежах возможности ее дальнейшего использования имеют высокую актуальность для Южно-Уральского региона.

Цель работы — анализ закономерностей формирования древесной растительности на неиспользуемых сельскохозяйственных землях в широколиственно-лесной и лесостепной зонах Башкирского Предуралья.

Задачи:

1. Подбор модельных территорий размером 100 км² в широколиственно-лесной и лесостепной зонах Башкирского Предуралья, выявление и ГИС-картирование участков неиспользуемых пашенных угодий.

2. Анализ изменения структуры сельскохозяйственного землепользования на модельных территориях с середины 90-х годов 20 века.

3. Разработка методов дистанционной оценки надземной биомассы и содержания углерода в древесном ярусе на залежах, а также методов ретроспективного анализа проективного покрытия древостоя.

4. Анализ пространственно-временных закономерностей изменения проективного покрытия древесной растительности на неиспользуемых пашнях с использованием ретроспективных космоснимков.

5. Анализ продуктивности, запасов фитомассы и углерода в древесной и травяной растительности на залежах в широколиственно-лесной зоне Башкирского Предуралья.

6. Разработка рекомендаций по дальнейшему использованию залежной растительности в широколиственно-лесной и лесостепной зонах Башкирского Предуралья.

Научная новизна. Впервые выявлены причины различия состава древесного яруса на зарастающих лесом неиспользуемых пахотных угодьях в широколиственно-лесной и лесостепной зонах Башкирского Предуралья. Разработаны дистанционные методы анализа текущих и ретроспективных значений проективного покрытия крон древостоя, а также его биомассы и содержания в ней углерода. Показано, что на распространение березняков на заброшенных пахотных землях влияют несколько переменных окружающей среды: совпадение или несовпадение направления разноса семян с направлением ветров в период рассеивания семян, высота деревьев-источников семян и выпас скота. Содержание углерода в древесине стволов березы на залежах в Башкирском Предуралье близко к аналогичным данным, полученным для гемибореальной зоны Прибалтики. Залежи с массовым лесовозобновлением древесных видов являются эффективными естественными резервуарами для накопления углерода. Установлены особенности депонирования углерода древостоем и почвой в зависимости от типа почв.

Научно-практическая значимость работы. Разработаны методы анализа дистанционной оценки биомассы разновозрастного древостоя на залежах и запаса в ней углерода. Полученные результаты по анализу пространственно-временной структуры зарастания заброшенных пашен позволяют объяснить возникновение мозаики, различной густоты и проективного покрытия березовых и сосновых лесов на заброшенных пашнях. Они позволяют прогнозировать зарастание березой и сосной на новых участках заброшенных сельскохозяйственных угодий и ход лесовосстановительной сукцессии, в зависимости от удаленности от источников семян и факторов среды обитания. Показано, что залежи с массовым лесовозобновлением являются эффективными естественными резервуарами для накопления углерода. Заложены модельные опыты по использованию березняков на залежах для создания карбоновых ферм.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Использование значений яркости красного канала на ранневесенних космоснимках может быть эффективно для оценки текущих и ретроспективных значений проективного покрытия древостоя, а лидарная съемка с БПЛА — для оценки наземной биомассы и запасов в ней углерода в разновозрастном древостое на залежах.

2. На распространение березняков на заброшенных пахотных землях влияют совпадение или несовпадение направления разноса семян с направлением преобладающих ветров, высота деревьев-источников семян и выпас скота. У сосны совпадение направления

разноса семян с направлением ветра играет меньшую роль чем у березы, что связано с тем, что семена сосны имеют бóльшую массу по сравнению с семенами березы.

3. При зарастании залежей древесной растительностью есть две противоположные зависимости между выживаемостью сеянцев и расстоянием до семенных деревьев: (1) перенос семян и плотность сеянцев уменьшаются с увеличением расстояния от семенного дерева и (2) вероятность выживаемости саженцев увеличивается из-за снижения конкуренции.

4. Наиболее спелые, 25–30-летние насаждения *Betula pendula* обеспечивают самый высокий среднегодовой прирост биомассы деревьев, а залежи с массовым лесовозобновлением древесных видов являются эффективными естественными резервуарами для накопления углерода.

Апробация работы. Основные положения работы доложены на всероссийской конференции с международным участием «Экобиотех», международной научно-практической конференции «Куражсковские чтения».

Поддержка исследования. Диссертационная работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-24-00186, <https://rscf.ru/project/22-24-00186/>, Гранта Министерства образования и науки Республики Башкортостан НОЦ-РМГ-2022 «Создание методологических основ оценки баланса парниковых газов и определения потенциала депонирования углерода в экосистемах» и Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Программа создания и функционирования карбонового полигона на территории Республики Башкортостан «Евразийский карбоновый полигон» на 2022-2023 годы.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 9 научных работ, в том числе 3 статьи, индексированные в системе международного цитирования WOS, и 3 статьи в издании, рекомендованном Перечнем ВАК РФ.

Личный вклад автора состоит в анализе литературных данных по теме исследования, участии в полевых экспедициях по сбору данных, их обработке и анализе данных, описании результатов исследования, участии в формулировании выводов, а также в подготовке статей и материалов к публикации по теме диссертации (совместно с научным руководителем). Текст диссертации написан автором лично.

Структура и объем диссертации. Работа изложена на 158 страницах, состоит из введения, 7 глав и выводов, содержит 25 рисунков и 23 таблицы. Список цитируемой литературы включает 257 источников, из них 207 на иностранном языке.

Благодарности. Автор выражает благодарность своему научному руководителю д.б.н., Н.И. Федорову за поддержку, организацию и формулирование основной идеи работы, сотрудникам лаборатории геоботаники и растительных ресурсов УИБ УФИЦ РАН: д.б.н., В.Б. Мартыненко, д.б.н. П.С. Широких, д.б.н. С.Н. Жигуновой, д.б.н. Э.З. Баишевой, к.б.н. А.А. Мулдашеву, И.Г. Бикбаеву, Г.В. Шендель, а также сотрудникам лаборатории лесоведения и почвоведения д.б.н. А.Ю. Кулагину, д.б.н. Г.А. Зайцеву, д.с.-х.н. Р.Х. Гиниятуллину, д.б.н. Р.В. Уразгильдину, к.б.н. О.В. Тагировой, д.б.н. И.М. Габбасовой, д.б.н. Р.Р. Сулейманову, к.б.н. М.А. Комиссарову, к.б.н. Л.В. Сидоровой УИБ УФИЦ РАН за помощь в сборе материала и консультациях.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

В главе представлен обзор причин прекращения использования сельскохозяйственных земель в России и за рубежом (Cramer et al., 2008; Люри и др 2010; Prévosto et al., 2011;

Широких и др., 2017; Глушков и др., 2019; Шварц и др., 2023). Рассмотрены методы изучения восстановительных сукцессий на заброшенных пашнях (Александрова, 1964; Wang et al., 1996; Wiens., 1997; Миркин и др., 1998; Foster, Tilman, 2000; Turner et al., 2001; Грабарник., 2007 Миркин, Наумова., 2012; Uri et al., 2012; Prishchepov et al., 2012; Alcantara et al. 2012, 2013; Широких и др., 2017; Estel et al., 2015). Проанализированы литературные данные о закономерностях формирования древесной растительности на заброшенных пашнях (Greene et al., 1989; Perala et al., 1990; Nathan et al., 1999; Horn et al., 2001; Cramer et al., 2008; Люри и др., 2010; Uri et al., 2012; Широких и др., 2017; Fedorov et al 2023), способы хозяйственного использования зарастающих пашен в России и мире (Vogel et al., 1998; Gong et al., 2006; Kuemmerle et al., 2010; Люри и др., 2010; Estel et al., 2015; Рыжова и др., 2015; Fayet et al., 2022; Subedi et al., 2022), а также способы повышения эффективности депонирования углерода древесной растительностью на залежах (Bergh., 1997; Johnson et al., 2001; Houghton et al., 2005; Peres et al., 2006; Aun et al., 2021).

ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалы исследования. В главе приведена краткая характеристика географического положения, климата, особенностей рельефа, почв и растительности Башкирского Предуралья.

Объекты исследования. Объектами исследования являлись зарастающие сельскохозяйственные угодья на двух модельных территориях (МТ) размером 10×10 км в широколиственно-лесной и лесостепной зонах РБ: МТ Мишкинская 55.648003 с.ш., 56.185718 в.д., МТ Белебеевская 54.165673 с.ш., 54.227907 в.д.

Методы исследования. Геоботанические описания древесной растительности проводились на площадках размером 20×20 м, а травяных типах растительности — на площадках размером 2х2 м с использованием подходов эколого-флористической классификации (Миркин, Наумова, 2004). Выделение стадий зарастания залежей древесной растительностью проводилась по методике П.С. Широких (2017) с добавочным выделением вариантов (табл 1).

Табл.1 Характеристика различных стадий и вариантов зарастания видом *Betula pendula* на залежных землях в зоне широколиственных лесов Башкирского Предуралья.

Стадии зарастания	I	II	III	IV	V
Высота деревьев, м	0,5–1,5	2–3	5–8	9–14	15–18
Возраст деревьев, лет	3–8	9–14	15–20	20–25	25–30
Диаметр стволов, см	–	1–3	6–8	10–14	16–20
Вариант 1 (ПП древесного яруса, %)	1–5	10–20	30–50	50–60	50–60
Вариант 2 (ПП древесного яруса, %)	7–10	30–50	60–80	75–90	75–90

Характеристики древостоя оценивались с использованием наземных лесотаксационных методов (Нуурра et al., 2020a, 2020b) и лазерного сканирования древостоев LIDAR-камерой, установленной на БПЛА Matrice 300 RTK (Næsset et al., 2002; Popescu et al., 2008; Sandström et al., 2006; Fedorov et al., 2023). Оценка надземной биомассы березняков осуществлялась методом модельных деревьев (Тишин., 2011; Fedorov et al., 2023). Возраст определялся с использованием древесного бура Haglöf (Långsele, Швеция). Оценка

надземной биомассы и мортмассы травяного яруса проводилась путем заложения 20-25 площадок размером 50×50 см на каждом варианте стадий лесовосстановления. На площадках срезалась фитомасса и собиралась мортмасса. Оценка подземной биомассы растений проводилась путем отбора образцов почв почвенным буром в слое 0-30 см. Содержание углерода в образцах анализировалось на элементном анализаторе CHNS EA-3100 (Eurovector, Павия, Италия) (Fedorov et al., 2023). Выявление заброшенных сельскохозяйственных угодий проводилось с использованием ретроспективных и современных космоснимков серии Landsat и Sentinel - 2 (Федоров и др., 2022). ГИС-картирование (сеточное и полигональное), расчет площадей залежей, анализ рельефа, расстояние древостоя от источника семян осуществлялись в программе QGIS 3.26 (URL: <http://qgis.osgeo.org>). Статистическая обработка с использованием регрессионного анализа и однофакторного анализа ANOVA проводилась в программе STATGRAPHICS 19 Centurion (URL: <https://www.statgraphics.com>).

ГЛАВА 3. ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ С 1990-х ГГ. НА МОДЕЛЬНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ В ШИРОКОЛИСТВЕННО-ЛЕСНОЙ И ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНАХ БАШКИРСКОГО ПРЕДУРАЛЬЯ

Анализ космоснимков Landsat 5 за период 1985-2010 гг. показал, что в середине 90-х годов прошлого века площадь используемой пашни на МТ «Мишкинская» составляла 4738 га, а на МТ «Белебеевская» – только 3005 га, что связано с тем, что на ней значительные площади занимали крутые склоны увалов и холмов, не пригодные для возделывания сельскохозяйственных культур.

С 1990-х гг. площадь пашни на МТ «Белебеевская» снизилась на 64%, а на МТ «Мишкинская» – на 72%. Доля зарастающих древесной растительностью залежей на обоих участках примерно одинакова и составляет чуть больше половины площади заброшенной пашни, что совпадает с литературными данными об очень больших объемах площадей зарастающих лесом залежей на территории РБ (URL: <https://maps.greenpeace.org/maps/aal/>). На МТ «Мишкинская» выше доля заброшенных пахотных земель, используемых в настоящее время под сенокосы, а на МТ «Белебеевская» заброшенные пашни не используются в качестве пастбищ, но часть площадей залежей использована под создание лесных культур, карьеров для добычи щебня, а также в качестве пашни после раскорчевки древостоя (рис. 2).



А

Б

– 1
 – 2
 – 3
 – 4
 – 5
 – 6
 – 7

Рис. 2. Современное использование распаханых в 1985 году полей на модельных территориях: А - «Мишкинская» в широколиственно-лесной зоне, Б - «Белебеевская» в лесостепной зоне РБ.

Современное использование территории пахотных земель 1985 года: 1 – пашни, 2 – залежи, зарастающие деревьями, 3 – залежи, зарастающие травянистой растительностью, 4 – сенокосы, 5 – раскорчевки древесной растительности на залежах, 6 – пастбища, 7 – посадки и карьеры для добычи щебня.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОЙ ОЦЕНКИ НАДЗЕМНОЙ БИОМАССЫ И СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА В ДРЕВЕСНОМ ЯРУСЕ И РЕТРОСПЕКТИВНОЙ ОЦЕНКИ ПРОЕКТИВНОГО ПОКРЫТИЯ ДРЕВОСТОЯ

Для разработки дистанционной оценки запасов надземной биомассы древостоя и содержания в ней углерода с использованием лидарной съемки построено по 8 моделей регрессионной зависимости фитомассы стволовой древесины с ветвями и фитомассы листьев от характеристик древостоя, рассчитанных по LiDAR-съемке. Все модели описываются нелинейными уравнениями. Значения корреляции (R) между фитомассой стволовой древесины с ветвями и характеристиками древостоя, рассчитанные по данным LiDAR-съемки, во всех случаях превышают 0,90, а детерминации (R^2) составляют более 88%. Установлено, что фитомасса стволовой древесины с ветвями, а также фитомасса листьев наиболее точно рассчитываются по произведению количества деревьев на их среднюю высоту (рис. 3).

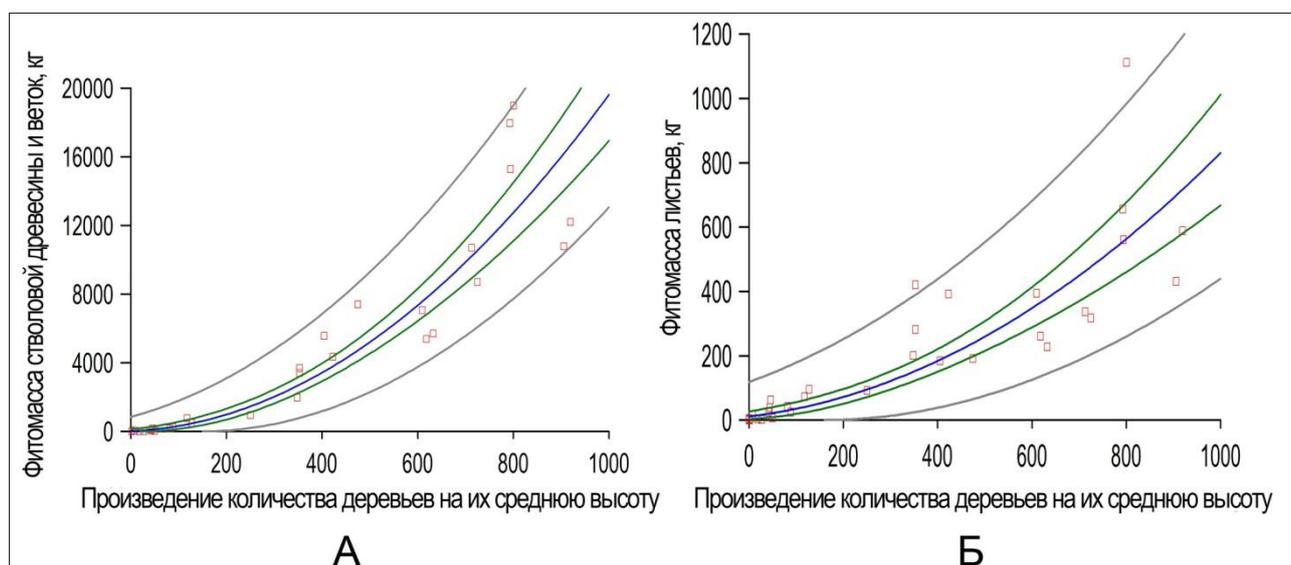


Рис. 3. Регрессионные модели расчета фитомассы стволовой древесины с ветвями и фитомассы листьев по характеристикам древостоя, рассчитанным по произведению количества деревьев на их среднюю высоту.

С использованием конверсионных коэффициентов пересчета запасов углерода в древесине и листьях, рассчитанных для березняков в широколиственно-лесной зоне (Fedorov et al., 2023), предложен способ расчета углерода по данным лидарной съемки:

$$CS = (3,33595 + 0,1372 \times X)2 \times 0,485 + (3,38375 + 0,0254409 \times X)2 \times 0,488$$

где CS — запасы углерода в березняке, X — произведение количества деревьев на их среднюю высоту.

Ошибка оценки запасов углерода по этой формуле в березняках 9–20-летнего возраста с проективным покрытием более 30% составляет от 7,9. до 21,4%, а в березняках 20-летнего возраста и старше — от 0,2 до 6,8 %. Предложенный метод позволяет использовать БПЛА для оценки запасов углерода в березняках на заброшенных пашнях.

Для оценки текущих и ретроспективных значений проективного покрытия крон (ППК) на зарастающих деревьями участках заброшенных пахотных земель использовали полигональную сетку с размером квадрата 30×30 м (Федоров и др., 2022), центры которых совпадали с центрами выделенных полигонов на карте-сетке. Всего на 189 пробных площадях с доминированием березы и на 170 пробных площадях с доминированием сосны были получены данные о ППК, составе древостоя и высоте деревьев (Федоров и др., 2022). Было рассчитано несколько уравнений регрессии для зависимости ППК от значений яркости красного (RED), ближнего инфракрасного (NIR), двух коротковолновых инфракрасных каналов (SWIR), а также нормализованного разностного индекса лесного снега (NDFSИ) в квадратах полигона по снимкам Landsat 8 и Sentinel-2 на разные даты зимы и ранней весны 2021 года. Наилучший результат показал расчет по красному каналу ранневесенних снимков (8 апреля 2021 года) (рис.4) (Федоров и др., 2023):

$$ППК_6 = (12,9157 - 17,4903 \times RED)^2$$

где RED — значения яркости красного канала, ППК₆ — проективное покрытие крон березы (Федоров и др., 2022).

Уравнение имеет коэффициент корреляции R = -0,90 и коэффициент детерминации R² = 81% (Федоров и др., 2022). Аналогичная оценка проективного покрытия по ранневесенним снимкам была отработана и для древостоев с доминированием сосны обыкновенной.

Оптимальное уравнение для сосны было рассчитано по ранневесеннему снимку за 22 марта 2022 года (рис.4):

$$\text{ППК}_c = 100,654 - 154,906 \cdot \text{RED}$$

где RED - значения яркости красного канала, ППК_с – проективное покрытие кроны сосны.

Уравнение имеет коэффициент корреляции $R=-0,97$ и коэффициент детерминации $R^2=94\%$.

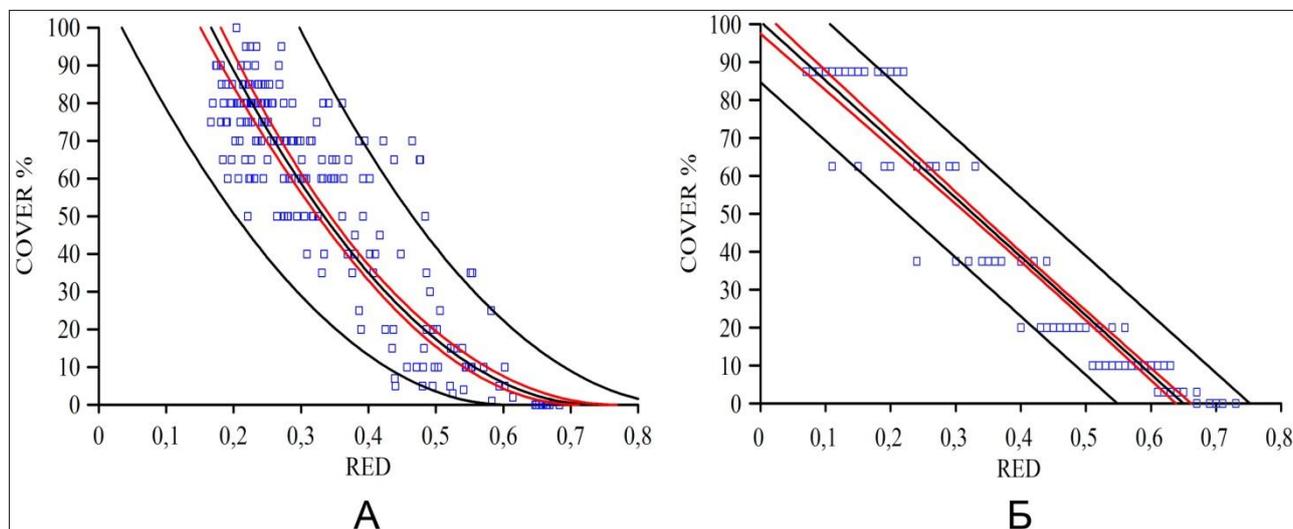


Рис.4. Регрессионные модели зависимости проективного покрытия кроны от значений яркости красного канала: А — березы; Б — сосны.

Предложенный метод позволяет проводить ретроспективный анализ формирования древостоя на залежах.

ГЛАВА 5. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ДРЕВЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ЗАЛЕЖАХ В ШИРОКОЛИСТВЕННО-ЛЕСНОЙ И ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНАХ БАШКИРСКОГО ПРЕДУРАЛЬЯ

Анализ ретроспективных космоснимков с использованием красного канала показал, что формирования древесной растительности на залежах на модельной территории в широколиственно-лесной зоне началось в 2000-2002 гг. (Fedorov et al., 2023), а в лесостепной зоне — в 2009-2010 гг. В качестве источников семян (ИС) в большинстве случаев выступали посадки березы (лесополосы). На участках залежей, расположенных вблизи сосновых насаждений, залежи зарастали сосной обыкновенной (*P. sylvestris*), однако такие участки широколиственно-лесной зоне не занимали значительных площадей. В этой зоне древостои березы занимают 95% от общей площади, зарастающих лесом залежей. Смешанные сосново-березовые древостои занимают всего 3%, а чистые сосняки — 2% (рис. 5). К настоящему времени на заброшенных полях сформировались загущенные березняки возрастом 18-22 лет, находящиеся в основном на 4 стадии лесовосстановления. В связи с неодновременным прекращением использования пашни в разных частях территории есть небольшие участки березняков возрастом 25 лет (пятая стадия зарастания). Молодые березняки, находящиеся на 1-3 стадии, почти отсутствуют.

В лесостепной зоне посадки сосны имеют большее распространение. В связи с этим наблюдается зарастание заброшенных полей сосной, а монодоминантные сосняки составляют 52% от общей площади бывшей пашни. Смешанные сосново-березовые

древостои занимают 47% от общей площади зарастающих полей, а чистые березняки – менее одного процента (рис. 5). Сосна отличается от березы более медленным ростом (Санников, 1985), поэтому на этой МТ встречаются сосняки только 1-3 стадий зарастания залежей.

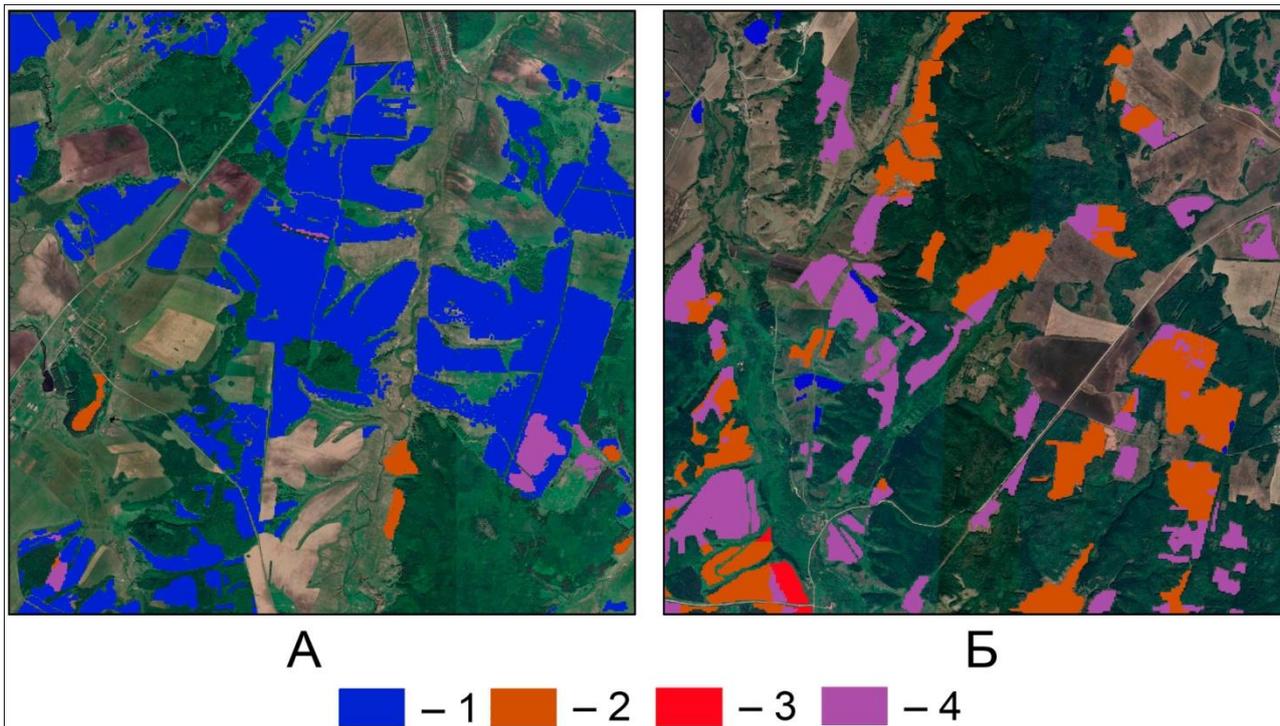


Рис. 5. Пространственное распределение различных древостоев на модельных территориях: А - «Мишкинская», Б - «Белебеевская».

Примечания: 1 — березняки, 2 — сосняки, 3 — кленовники (клен ясенелистный), 4 — смешанные сосново-березовые древостои.

Почти полное отсутствие чистых березняков связано с тем, что условия, благоприятные для семенного размножения березы, на Бугульминско-Белебеевской возвышенности бывают реже, чем в широколиственно-лесной зоне (примерно один раз в 7–10 лет) (Краснобаева и др., 2007). В крайне сухое и жаркое лето 2010 г. отмечалась как атмосферная, так и почвенная засуха до глубины 1,5 м и более, что повлекло гибель подроста березы (Газизуллин и др., 2014). Локальные засухи в лесостепной зоне часто сопровождаются низовыми пожарами, способствующими естественному возобновлению сосны, продолжению формирования древостоя сосны на залежах и сокращению площади травяных сообществ. Вблизи урбанизированных территорий встречаются интразональные сообщества с кленом ясенелистным (*Acer negundo* L.), которые так же, как и чистые березняки, не занимают больших площадей.

На 4-х пробных площадях (ПП) на МТ «Мишкинская» проанализированы пространственно-временные закономерности изменения проективного покрытия древесных видов в ходе лесовосстановительных сукцессий. Источниками семян на 3-х ПП были посадки березы, а на одной (ПП 2) источником семян была узкая полоса естественного березняка в понижении рельефа. Протяженность участков от источников семян до противоположного края зарастающей ПП составляла от 391 м до 776 м. В период рассеивания семян березы (июль-сентябрь) преобладали западные и северо-западные ветра. Направление разноса семян не совпадало с преобладающими направлениями ветров (рис. 6).

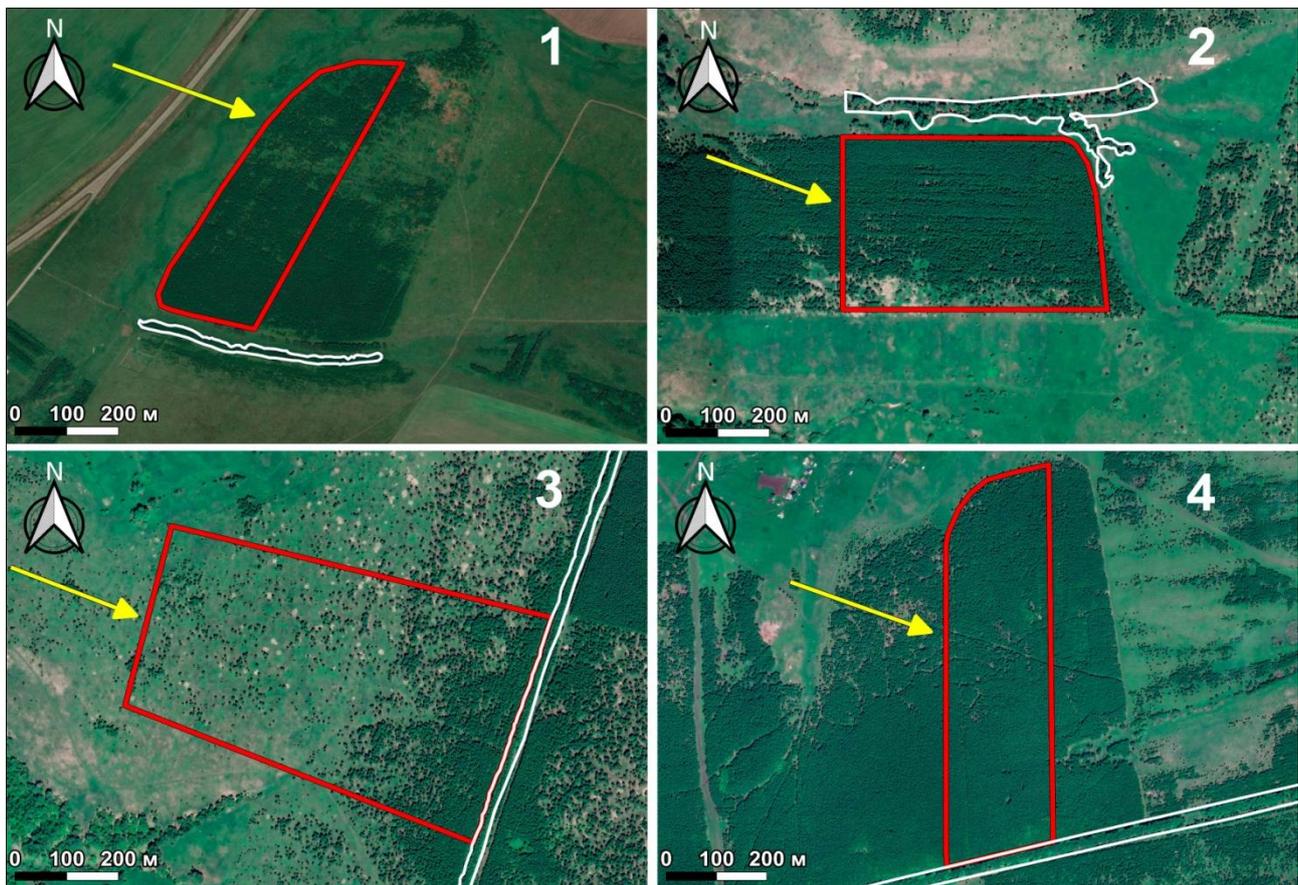


Рис. 6. Преобладающее направление ветра и расположение источников семян на зарастающих березой повислой (*Betula pendula*) пробных площадях, расположенных на заброшенной пашне в широколиственно-лесной зоне Башкирского Предуралья.

Примечания: Желтые стрелки показывают преобладающее направление ветра, а белые линии указывают участки с взрослыми березами - источниками семян.

Из рис. 7 видно, что на участке 1 в 2009 году ППК березнякав среднем составляло 24% на расстоянии до 100 м и не более 5% на расстоянии 200-600 м. Сила влияния фактора «расстояние от источника семян» составила 0,76, а к 2022 году снизилась до 0,18. На участке 2 с более низкой высотой деревьев-источников семян, ППК сила влияния данного фактора изменялась слабо. В 2022 году ППК выровнялось на расстоянии до 300 м от источника семян и достигла в среднем 80%, а на противоположном краю участка образовалось редколесье. На участке 3 с направлением ветра, противоположном направлению распространения семян, сформировалась четкая тенденция к уменьшению ППК по мере удаления от источника семян. В 2022 году сомкнутый древостой на этом участке сформировался только на расстоянии до 200 м от семенных деревьев. В период формирования древостоя (в 2009 г.) на подверженном выпасу скота участке 4 ППК был выше, чем на других участках, и составлял 53%, а сила влияния фактора «расстояние от источника семян» составляла 0,90. В 2022 году сила влияния фактора этого снизилась до 0,45, при этом ППК древостоя стало максимальным на расстоянии 600–800 м от источника семян. Таким образом, на распространение березняков на заброшенных пахотных землях в широколиственно-лесной зоне Предуралья влияют несколько переменных окружающей среды: совпадение направления преобладающих ветров с направлением разноса семян, высота деревьев – источников семян, а также выпас скота. В целом, выявлены две противоположные зависимости между выживаемостью сеянцев и расстоянием до семенных деревьев: (1) перенос семян и плотность сеянцев уменьшаются с

увеличением расстояния от семенного дерева и (2) вероятность выживаемости семян/саженцев увеличивается из-за снижения конкуренции. Совпадение направления преобладающих ветров и с направлением разноса семян у сосны играло меньшую роль чем у березы, что связано с бóльшей массой семян у сосны по сравнению с семенами березы.

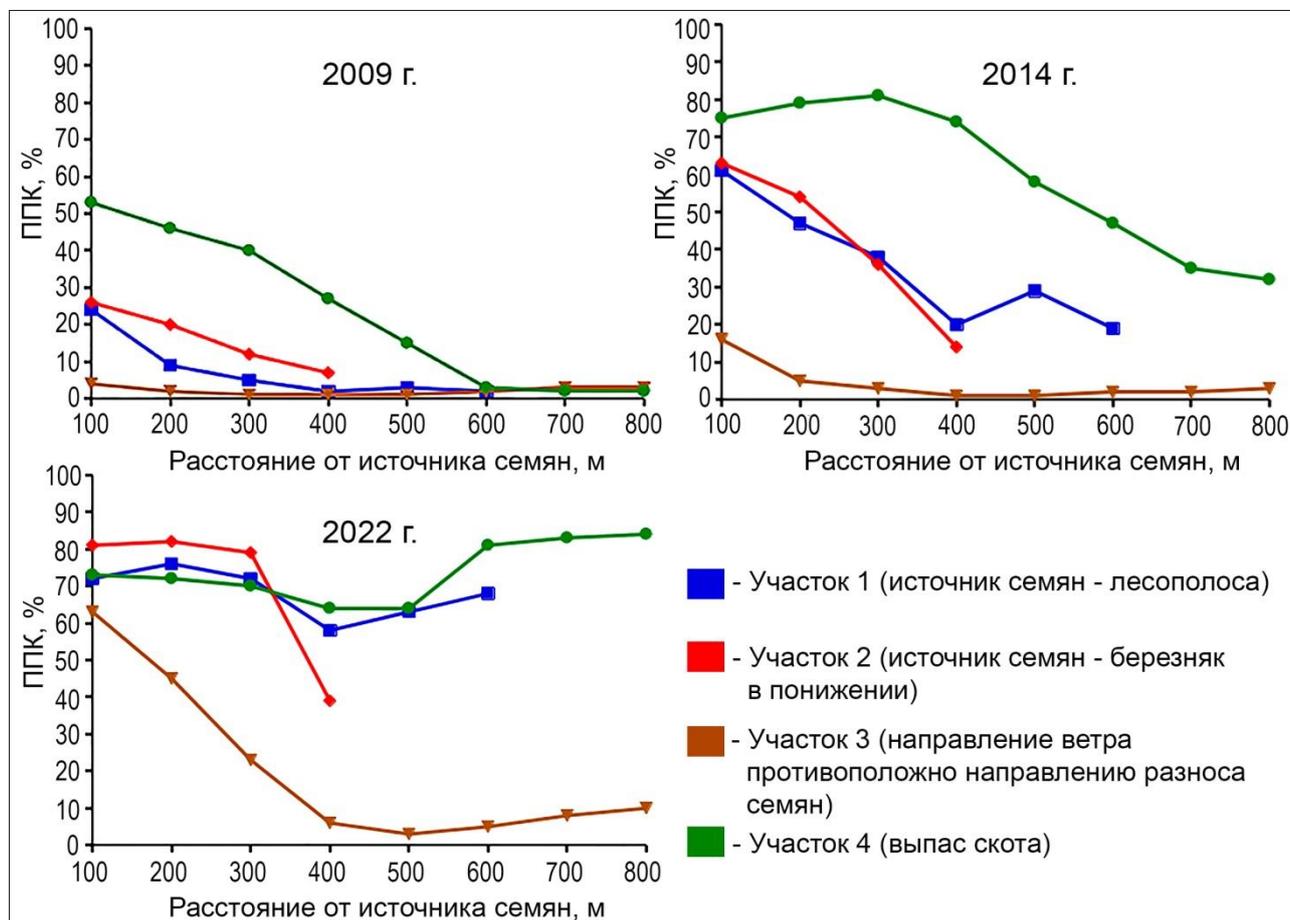


Рис. 7. Влияние расстояния от источника семян на проективное покрытие *Betula pendula* при зарастании неиспользуемой пашни на участках в широколиственно-лесной зоне Башкирского Предуралья.

Таблица 2. Изменение силы влияния фактора удаленности от семенных деревьев на проективное покрытие кроны *Betula pendula* при формировании древостоев на заброшенных пашнях в широколиственно-лесной зоне Башкирского Предуралья.

№ участка	Сила влияние фактора η^2						
	2009 г.	2012 г.	2014 г.	2016 г.	2017 г.	2021 г.	2022 г.
1	0,76	0,57	0,53	0,49	0,45	0,24	0,18
2	0,61	0,70	0,69	0,64	0,67	0,63	0,63
3	0,40	0,72	0,64	0,69	0,68	0,76	0,78
4	0,90	0,86	0,74	0,47	0,35	0,40	0,45

Примечание η^2 – отношение межгрупповой дисперсии к общей.

ГЛАВА 6 ЗАПАСЫ ФИТОМАССЫ И УГЛЕРОДА В РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ЗАЛЕЖАХ МОДЕЛЬНЫХ ТЕРРИТОРИЙ В ШИРОКЛИСТВЕННО-ЛЕСНОЙ ЗОНЕ БАШКИРСКОГО ПРЕДУРАЛЬЯ

Залежи являются крупными аккумуляторами углерода и способствуют сокращению выбросов парниковых газов, играя тем самым важную роль в процессах глобального изменения климата (Sileika et al., 2006; Lal et al., 2015; Kalinina et al., 2015; Kurganova et al., 2015). Установлено, что запасы надземной фитомассы травяного яруса залежей на МТ «Мишкинская» сильно зависят от типа залежной растительности. На пятой стадии зарастания запасы фитомассы древесного яруса в ходе лесовосстановительной сукцессии увеличивались до 2450,23 ц/га. Сравнение показателей древесного и травяного яруса в 4-х типах залежной растительности (табл.2.) показало, что максимальные запасы надземной фитомассы травяного яруса характерны для влажного луга с сенокосным использованием, которые составляют в среднем 38,23 ц/га (табл. 2).

Таблица 3. Запасы биомассы травяного и мохового ярусов на разных типах залежной растительности на модельной территории «Мишкинская» в широколиственно-лесной зоне Башкирского Предуралья

Типы залежной растительности	Запасы, ц/га					Общая биомасса
	В надземной фитомассе древесного яруса	В надземной части травяного яруса	В мортмассе	В фитомассе мхов	В подземной фитомассе	
Травяные сообщества						
Сухой луг с сенокосением		21,96±1,95	14,71±1,77		101,47±6,44	138,15±8,02
Влажный луг с сенокосением		38,23±1,48	45,15±2,46		98,42±10,83	181,80±11,37
Пастбище		7,64±0,72	4,84±0,83	2,23±0,85	82,04±6,26	96,75±5,98
Травяная залежь без хозяйственного использования		26,48±2,97	57,80±6,63	0,004±0,003	88,84±6,10	173,15±9,50
Зарастающие лесом залежи						
С1В1*		34,70±1,65	5,21±0,59		23,96	58,66
С1В2		32,36±2,18	2,64±0,53		25,10	57,46
С2В1	6,77	32,60±1,95	9,73±1,03		23,75	63,12
С2В2	28,85	21,77±1,93	21,81±3,29		30,81	81,43
С3В1	217,50	17,41±3,55	38,89±3,75		53,12	288,03
С3В2	403,01	1,27±0,34	67,05±6,26		59,47	463,75
С4В1	554,44	6,28±1,37	56,25±9,34		30,48	591,2
С4В2	703,40	1,41±0,45	70,40±4,25		42,03	746,84
С5В2	2450,23	2,85±0,34	112,30±6,97		43,27	2496,35

Примечание: С - Стадия зарастания, В – Вариант.

Минимальные запасы надземной фитомассы травяного яруса отмечаются в сомкнутых березовых древостоях 3 и 4 стадий зарастания (табл. 2). В не зарастающих лесом травяных

залежных сообществах подземная фитомасса вносит более существенный вклад в общие запасы биомассы и составляет от 51,3% (на неиспользуемых залежах) до 84,8% (на пастбищах). Минимальные запасы подземной фитомассы характерны для 1 и 2 стадий зарастания залежей березой (табл. 2), а максимальные - для сухого луга с сенокошением (табл. 2).

Запасы мортмассы составляют от 4,4% до 70,9% от общей биомассы. Минимальные запасы мортмассы, в основном состоящей из ветоши злаков, характерны для залежной растительности 1 стадии зарастания березой (табл. 2) и в пастбищных сообществах (табл. 2). Максимальные запасы мортмассы выявлены на 5 стадии зарастания березой (табл. 2).

Содержание углерода в серой лесной почве в ходе лесовосстановления увеличилось почти в два раза, достигая 4,4% на 5 стадии. Во всех сукцессионных стадиях содержание углерода в темно-серой лесной почве было в 1,5–2,5 раза выше, чем в серой лесной почве и в ходе лесовосстановления почти не увеличивалось

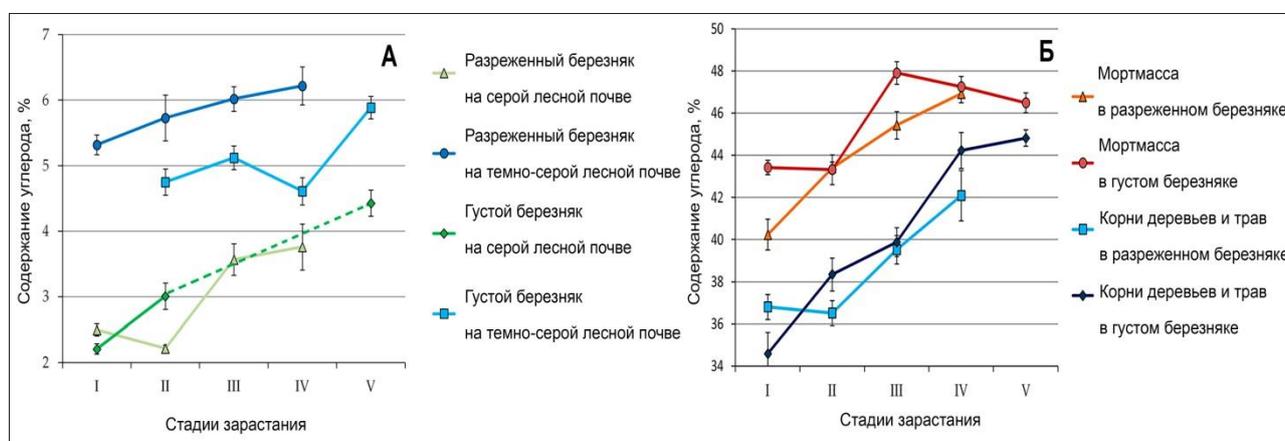


Рис. 7. Содержание углерода, аккумулированного в почве, мортмассе и подземной биомассе, на разных стадиях зарастания *Betula pendula* на залежах в широколиственно-лесной зоне Башкирского Предуралья: А — в почве; Б — в мортмассе и подземной биомассе.

Содержание углерода в надземной фитомассе древесного яруса составляло от 48,7% до 49,5%, а в надземной фитомассе травяного яруса – от 39,2% до 42,9%. В мортмассе и в подземной фитомассе оно варьировало сильнее и в разных типах залежной растительности составляло, соответственно, от 36,5% до 47,9% и от 26,9% до 43,3%. В целом, содержание углерода в древесине березы на залежах в Предуралье близко к аналогичным данным, полученным в гемибореальной зоне Прибалтики (Uri et al., 2012).

Таблица 4. Содержание углерода в биомассе в разных типах залежной растительности на модельной территории «Мишкинская» в широколиственно-лесной зоне Башкирского Предуралья

Типы залежной растительности	Содержание углерода, %				
	В надземной фитомассе древесного яруса	В надземной части травяного яруса	В мортмассе	В фитомассе мхов	В подземной фитомассе
Травяные сообщества					
Сенокос сухой		42,0±0,1	37,8±0,4		39,3±0,5
Сенокос влажный		41,9±0,1	40,8±0,3		39,7±0,4

Пастбище		41,1±0,3	36,5±0,6	36,5±0,4	39,4±0,3
Травяная залежь		42,9±0,2	41,1±0,4	38,4±0,01	39,4±0,4
Зарастающие лесом залежи					
C1B1		42,4±0,3	40,2±0,7		34,3±1,9
C1B2		42,4±0,2	43,4±0,3		33,5±2,0
C2B1	49,0	43,3±0,2	43,4±0,3		30,4±2,0
C2B2	49,5	42,9±0,2	43,3±0,7		26,9±3,4
C3B1	49,3	42,6±0,2	45,4±0,7		33,8±2,7
C3B2	48,7	39,2±1,1	47,9±0,5		39,4±0,8
C4B1	48,9	41,9±0,5	46,9±0,4		38,3±2,8
C4B2	48,8	40,7±0,7	47,3±0,5		43,3±0,8
C5B2	49,1	42,7±0,3	46,5±0,5		41,5±0,9

Примечание: С - Стадия зарастания, В – Вариант.

Общие запасы депонированного углерода в растительности всех типов залежей на МТ «Мишкинская» составили 122,9 тыс. тонн С (средний запас 12,3 тонн С/га), что соответствует 449,5 тыс. тонн CO²-экв. (среднее количество депонирования поглощённого углекислого газа 44,95 тонн CO²-экв. /га). Установлено, что залежи с массовым лесовозобновлением являются эффективными естественными резервуарами для накопления углерода.

ГЛАВА 7 ОБ ПЕРСПЕКТИВАХ ДАЛЬНЕЙШЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗАЛЕЖНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

На МТ «Белебеевская» доля естественных пастбищ выше вследствие холмисто-увалистого рельефа (Абдрахманов и др., 2005), в связи с этим, травяную растительность залежей на склонах целесообразно использовать в качестве сенокосов, а на выровненных участках с черноземами – раскорчевывать и повторно распахать для посевов многолетних трав или зерновых культур. На МТ «Мишкинская» березняки, произрастающие на залежах с более бедными серыми лесными почвами, в среднем, имеют возраст около 24 лет, и приближаются к возрасту рубок (40-60 лет). Древесина березы может быть использована не только в качестве топлива, но и при производстве фанеры, ДСП и т.д. Быстрорастущие деревья *B. pendula*, могут способствовать как высокому производству древесной биомассы, так и увеличению запасов органического углерода в почве за относительно короткий период времени (Cannell et al., 1995; Crigal et al., 1998; Laganierie et al., 2010; Dimitriou et al., 2012, 2017).

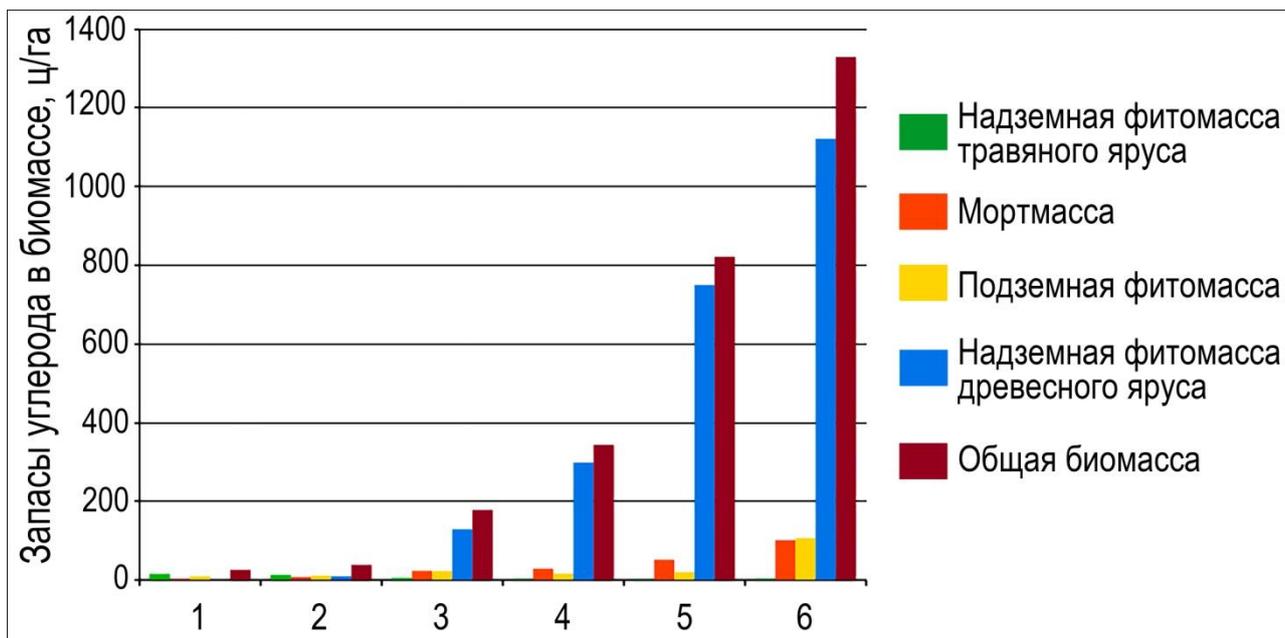


Рис. 8. Изменение запасов углерода на единицу площади в зависимости от стадии лесовосстановления на участке карбоновой фермы модельной территории «Мишкинская». 1-5 — стадии лесовосстановления, 6 — спелый березняк возрастом 50 лет.

Из рис. 8 видно, что, начиная с 3 стадии лесовосстановления, бóльшая часть запасов углерода депонирована в древесном ярусе. При этом, запасы углерода на залежах, зарастающих древесной растительностью, увеличиваются с возрастом и достигают максимальных значений в возрасте 50 лет.

Для разработки и апробирования методик увеличения секвестрационного потенциала березняков, находящихся на 4-5 стадии лесовосстановления, создана модельная карбоновая ферма, на которой заложены 15 круговых пробных площадей диаметром 30 м. Секвестрационный потенциал участка березняков, выбранных для создания карбоновой фермы, находящихся на 4-5 стадии лесовосстановления, составляет от 50,8 тонн/га до 132,7 тонн/га, что соответствует 186,4 и 487 тонн CO₂ (экв.) /га, а средняя скорость секвестрации углерода в древостое березы составляет 2,7 т/га/год. На этих площадках начаты опыты по использованию различных концентраций удобрений и прореживанию загущенного древостоя.

ВЫВОДЫ

1. ГИС-картирование и анализ двух модельных территорий размером 100 км² в широколиственно-лесной и лесостепной зонах Башкирского Предуралья показали, что доля пахотных угодий в лесостепной зоне с холмисто-увалистом рельефом была ниже, чем на участках с плоским рельефом в широколиственно-лесной зоне. Данное соотношение сохранилось и для заброшенных пахотных угодий, причем доли зарастания заброшенной пашни древесными видами в обеих зонах одинаковы и составляют чуть больше половины площади залежей. В широколиственно-лесной зоне в древостое зарастающих залежей преобладает *Betula pendula*, а в лесостепной зоне – *Pinus sylvestris*, что связано с большей устойчивостью подроста сосны к засухам и распространением после пожаров.

2. Различия в современном использовании залежной растительности в анализируемых зонах обусловлены текущими потребностями в сенокосных и пастбищных

кормах: в широколиственно-лесной зоне выше доля залежей, используемых в качестве сенокосов и пастбищ, а в лесостепной зоне часть залежей использована для создания лесных культур, добычи щебня, а также для распашки после раскорчевки древостоя.

3. Использование значений яркости красного канала на ранневесенних космоснимках может быть эффективно для оценки текущих и ретроспективных значений проективного покрытия крон древостоя, а лидарная съемка с БПЛА — для оценки его наземной биомассы и запасов в ней углерода.

4. На распространение березняков на заброшенных пахотных землях в широколиственно-лесной зоне Предуралья влияют несколько переменных окружающей среды: совпадение или не совпадение направления преобладающих ветров с направлением распространения семян, высота деревьев-источников семян и выпас скота. Совпадение направления преобладающих ветров с направлением разноса семян у сосны играет меньшую роль чем у березы, что связано с бóльшей массой семян у сосны по сравнению с семенами березы. В целом выявлены две противоположные зависимости между выживаемостью сеянцев и расстоянием до семенных деревьев: (1) перенос семян и плотность сеянцев уменьшаются с увеличением расстояния от семенного дерева и (2) вероятность выживаемости семян/саженцев увеличивается из-за снижения конкуренции.

5. Содержание углерода в стволовой древесине березы и в травяном ярусе не зависело от стадий сукцессии, что во многом соответствует литературным данным. В серой лесной почве по мере роста древостоев содержание углерода увеличилось с 2,5 до 4,4%, а в более плодородной темно-серой лесной почве изменялось незначительно. При этом биомасса и депонирование углерода древостоями на пробных площадях, расположенных на темно-серых лесных почвах, было выше, чем на серых лесных почвах.

6. Средняя скорость секвестрации углерода в древостое березы составила 2,7 т/га/год, что позволяет сделать вывод о том, что залежи с массовым лесовозобновлением древесных видов являются эффективными естественными резервуарами для накопления углерода.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных изданиях Web of Science и Scopus

1. Fedorov N., Bikbaev I., Shirokikh P., Zhigunova S., **Tuktamyshev I.**, Mikhaylenko O., Martynenko V., Kulagin A., Giniyatullin R., Urazgildin R., Komissarov M., Belan L. Estimation of Carbon Stocks of Birch Forests on Abandoned Arable Lands in the Cis-Ural Using Unmanned Aerial Vehicle-Mounted LiDAR Camera // *Forests*. – 2023. – Vol. 14. – Article 2392. DOI:10.3390/f14122392.

2. Fedorov N., **Tuktamyshev I.**, Bikbaev I., Shirokikh P., Zhigunova S., Baisheva E., Martynenko V. Spatiotemporal dynamics of *Betula pendula* crown cover on abandoned arable land in a broad-leaved forest zone of Bashkir Cis-Ural // *Forests*. – 2024, Vol. 15. – Article 34. DOI:10.3390/f15010034.

3. Fedorov N., Shirokikh P., Zhigunova S., Baisheva E., **Tuktamyshev I.**, Bikbaev I., Komissarov M., Zaitsev G., Giniyatullin R., Gabbasova I., Urazgildin R., Kulagin A., Suleymanov R., Gabbasova D., Muldashev A., Maksyutov S. Dynamics of Biomass and Carbon Stocks during Reforestation on Abandoned Agricultural Lands in Southern Ural Region // *Agriculture*. – 2023. – Vol. 13. №. 7. – P. 1427. DOI:10.3390/agriculture13071427.

Публикации в научных изданиях, входящих в перечень ВАК

4. Федоров Н.И., Широких П.С., Мартыненко В.Б., Туктамышев И.Р.

Использование зимних и ранневесенних космоснимков для оценки проективного покрытия березняков на залежах // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2022. – №. 59. – С. 110-127.

5. Широких П.С., Федоров Н.И., **Туктамышев И.Р.**, Бикбаев И.Г., Мартыненко, В.Б. Закономерности лесовосстановительных сукцессий на заброшенных сельскохозяйственных землях Башкирского Предуралья // Экология. – 2023. – №. 3. – С. 179-187.

6. Баишева Э.З., Федоров Н.И., Жигунова С.Н., Широких П.С., Комиссаров М.А., Габбасова И.М., Мулдашев А.А., Бикбаев И.Г., **Туктамышев И.Р.**, Шендель Г.В., Сулейманов Р.Р., Гарипов Т.Т. Продуктивность растительности и запасы углерода в луговой степи на залежи в Башкирском Предуралье (Южно-Уральский регион). Юг России: экология, развитие. – 2023. Т. 18. №. 4. С. 64-73.

Публикации в научных изданиях, входящих в перечень РИНЦ

7. **Туктамышев И.Р.**, Широких П.С., Муллагулов Р.Ю. Об информативности спектральных каналов и NDVI спутника ДЗЗ Landsat 5 TM Landsat 7 ETM+ для оценки стадий зарастания леса заброшенных сельскохозяйственных территорий // Экобиотех. – 2021. Т. 4. №. 3. С 178-185.

8. **Туктамышев И.Р.**, Федорова Ю.А., Федоров Н.И., Широких П.С. Закономерности современного использования заброшенных сельскохозяйственных земель в широколиственно-лесной и лесостепной зонах Республики Башкортостан // Экобиотех. – 2022. Т. 5. № 3. С. 152-160.

9. **Туктамышев И.Р.** Пространственные закономерности формирования березняков на залежах в широколиственно-лесной зоне Башкирского Предуралья // Куражсковские чтения. – 2023. – С. 297-300.