

УДК 630*116.64+504.7

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТА НА ЗАПАСЫ УГЛЕРОДА ФИТОМАССЫ И ПОДСТИЛКИ В ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЯХ ЮГА ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ¹

© 2023 г. В. В. Каганов^{a, *}, Д. Г. Замолодчиков^{a, b}, А. С. Мостовая^a^aЦентр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, ул. Профсоюзная, д. 84/32, Москва, 117997 Россия^bВысшая школа экономики, Покровский бульвар, д. 11, Москва, 109028 Россия

*E-mail: saganss@rambler.ru

Поступила в редакцию 22.10.2022 г.

После доработки 22.05.2023 г.

Принята к публикации 30.05.2023 г.

Современное глобальное изменение климата все более усиливает свои проявления, воздействуя на антропогенные и природные системы. Биоклиматические модели прогнозируют значительные сдвиги границ биомов, в том числе сокращение доли лесов на лесостепных территориях. Этот процесс может сказаться и на запасах углерода. Цель работы состояла в оценке воздействия климата и его изменений на величины и изменения запасов углерода в фитомассе древостоя по данным повторных обследований постоянных пробных площадей. В южных областях Европейской территории России было выбрано 8 лесных объектов, в которых устроены пробные площади. На пробных площадях проведены повторные обследования в 2010–2011, 2014–2015, 2019–2020 гг. Запасы углерода живой и сухостойной части древостоя оценены методом расчета по таксационным характеристикам. Запасы углерода подстилки определены весовым методом. Проведен анализ метеорологической информации по метеостанциям, наиболее близким к объектам исследования. Среднегодовая температура за 1991–2020 гг. возросла по сравнению с 1961–1990 гг. на 1.13°C, что в 2.5 раза больше, чем в среднем по планете. Годовые суммы осадков при этом уменьшились с 448.2 мм до 445.4 мм. Среднее значение гидротермического коэффициента Г.Т. Селянинова за май–сентябрь в 1961–1990 гг. составляло 0.85, а в 1991–2020 гг. 0.79. Запас углерода фитомассы древостоя в исследованных лесных насаждениях варьировал от 38.5 ± 7.4 т С га⁻¹ до 270.6 ± 52.8 т С га⁻¹. При повторных обследованиях были выявлены как увеличения, так и уменьшения запасов углерода фитомассы, составлявшие за пятилетний интервал от -23.8 до 31.9 т С га⁻¹. Сравнение запасов углерода фитомассы с климатическими характеристиками выявило статистически достоверную связь с ГТК за май–сентябрь. Однако сравнение изменений фитомассы с изменениями среднегодовой температуры, годовых осадков и ГТК за май–сентябрь не выявило значимых зависимостей. Отсутствие значимых связей изменений углерода фитомассы с изменениями климатических параметров может определяться устойчивостью лесных экосистем, обеспечивающей сохранение их функций на временных интервалах в несколько лет.

Ключевые слова: лесные культуры, лесополосы, нагорные дубравы, запас углерода, фитомасса, сухостой, подстилка, изменения климата.

DOI: 10.31857/S0024114823050030, EDN: OLEWBU

Современное глобальное изменение климата все более усиливает свои проявления, воздействуя на антропогенные и природные системы. Эти проявления существенно различаются в разных регионах Земного шара и даже в пределах одной страны, особенно если речь идет о таких крупных государствах, как Российская Федерация. Согласно Докладу Росгидромета (Доклад об особенностях климата ..., 2022), наиболее сильно

за последние 45 лет температура воздуха выросла в арктической зоне Центральной и Восточной Сибири (примерно на 3.6–4.5°C). Вторая область интенсивного потепления в России представлена южной половиной Европейской территории России (ЕТР), в которой температура с 1976 г. возросла на 2.3–3.6°C. Для этой территории за тот же период характерно постоянство осадков, что приводит к ухудшению гидротермических условий (Valentini et al., 2020). Дополнительным неблагоприятным фактором являются засухи и волны жары, частота которых в России увеличивается.

¹ Работа выполнена при поддержке РНФ № 22-27-00641 “Климатические эффекты масштабного лесоразведения в аридных регионах России”.

Отмеченные климатические тенденции создают проблемы для сельского хозяйства в рассматриваемом регионе, который является основной житницей страны в силу широкого распространения наиболее плодородных черноземных почв. Из древесных пород в регионе доминирует дуб черешчатый, представленный массивами нагорных, пойменных и байрачных лесов, а также многочисленными лесными культурами. Дуб часто используют в полезащитных лесополосах вместе с вязом приземистым, ясенем обыкновенным, кленом остролистым и липой мелколистной. Климатические тенденции должны сказываться и на лесных насаждениях, во всяком случае, во многих публикациях отмечается ухудшение состояния лесополос в связи с климатическими вариациями (Убугунов и др., 2017; Сапанов, Сиземская, 2020; и др.). Биоклиматические модели на фоне будущего потепления прогнозируют уменьшение площадей лесов и увеличение распространения травяных экосистем на лесостепных территориях (Mátyás et al., 2014; и др.). Изменения соотношений площадей лесных и травяных экосистем может сказаться и на балансе углерода, сдвинув его в сторону источника при постепенной деградации лесных насаждений. Поскольку изменения климата на юге ЕТР зашли достаточно далеко, можно ожидать, что негативные последствия потепления для баланса углерода в лесных насаждениях юга ЕТР могут быть заметны уже сейчас. Цель настоящей работы состоит в оценке воздействия климата и его изменений на величины и изменения запасов углерода в фитомассе древостоя по данным повторных обследований постоянных пробных площадей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Объекты исследования — постоянные пробные площади в лесных насаждениях южных регионов ЕТР. Система площадок наблюдения была создана в 2010–2014 гг. (Каганов, 2012), расширялась и дополнялась в 2015–2021 гг. Большая часть пробных площадей расположена в лесных культурах, но имеются и участки лесов естественного происхождения.

Объект “Пенза” (52.964325° с.ш., 45.043398° в.д.) представляет собой северный участок государственной защитной лесной полосы Пенза–Белая Калитва, которая была создана в конце 1940-х–начале 1950-х гг. в рамках работ по т.н. Сталинскому плану преобразования природы 1948 г. Располагается объект в Пензенском р-не Пензенской обл., к югу от г. Пензы. Насаждение состоит из трех лесных полос шириной 60 м и расстоянием между лесополосами 300 м. На различных участках лесополосы был использован широкий ассортимент древесных пород, посадка осуществлялась рядами по 10–12 рядов в одной линии лесополосы.

Пробные площади расположены в северной части восточной и центральной линий, главными породами являются липа мелколиственная, ясень обыкновенный, дуб черешчатый, клен остролистый, единично встречаются береза повислая и яблоня лесная.

Объект “Лес на Ворскле” (50.614014° с.ш., 35.975512° в.д.) находится в Борисовском р-не Белгородской обл. и является одним из участков ГПЗ “Белогорье”. Лесной массив представляет собой нагорную лесостепную дубраву (Рыжков, 2001). Участок исследований расположен в юго-восточной части насаждения на плакорном местоположении. Постоянная пробная площадь размером 125 × 80 м (1 га) была организована В.Н. Сукачевым в 1935 г. (Карандина, 1949) в условно-коренном старовозрастном лесу с доминированием дуба черешчатого. К моменту заложения ПП возраст дубов оценивался в 300 лет, участок являлся эталоном старовозрастных лесостепных дубрав. По данным последних описаний (2019 г.), доминирующее положение в древостое как по составу, так и по запасу стволовой древесины занял клен остролистый, доля дуба черешчатого в запасе растущих деревьев сократилась до 30%. Наряду с кленом остролистым и дубом черешчатым в составе древостоя отмечаются липа мелколиственная, вяз гладкий и клен полевой.

Объект “Шипов лес” (50.665486° с.ш., 40.356237° в.д.) также является одной из нагорных дубрав лесостепной зоны. Лесной массив располагается в Бутурлиновском и Павловском р-нах Воронежской обл. Лес имеет естественное происхождение, однако из-за высокой ценности дубовой древесины и ее широкого использования для нужд флота и народного хозяйства значительная часть леса неоднократно вырубалась в XVIII и XIX вв., эксплуатация насаждения продолжается и в настоящее время. Наряду с использованием дубрав естественного происхождения, с XIX в. в Шиповом лесу проводились широкомасштабные опыты по созданию лесных культур (Бугаев, Мусиевский, 2000). Главной породой Шипового леса является дуб черешчатый, породами-спутниками — липа мелколиственная, ясень обыкновенный, груша лесная, клены остролистый и полевой. Точки наблюдения располагаются в 67 квартале Красного лесничества.

Объект “Каменная степь” (51.028983° с.ш., 40.726155° в.д.) располагается в Таловском р-не Воронежской обл. на территории природного заказника “Каменная степь”, вошедшего в состав Воронежского заповедника. Данный объект был организован в конце XIX в., как один из трех научно-исследовательских участков “Особой экспедиции” В.В. Докучаева. В качестве точки наблюдения участка была использована лесная полоса № 40, высаженная в 1903 г. лесничим Н.А. Михай-

ловым. Насаждение располагается на водораздельном участке в виде широкой ленты длиной 725 м и шириной до 130 м, ориентированной с севера на юг. Центральная часть лесной полосы имела разделение на 12 опытных участков, которые представляли собой разнообразные варианты смещения дуба черешчатого с другими древесными породами. На площадках наблюдения, расположенных в южной части лесонасаждения, главной породой является дуб черешчатый, в качестве сопутствующих пород отмечаются клен остролистный, вяз гладкий и липа мелколистная.

Объект “Шемякинская лесная дача (ЛД)” (50.692741° с.ш., 41.643708° в.д.) представляет собой массив естественного байрачного леса с многочисленными лесными культурами, созданными в XIX–XX вв. Насаждение располагается на склонах и по дну двух глубоких балок. Объект находится в Урюпинском р-не Волгоградской обл. В середине XX в. Шемякинская лесная дача была объявлена памятником природы. Главной породой в насаждении является дуб черешчатый, к настоящему времени в центральной части массива сохранились участки с уникальными для степной зоны экземплярами дубов возрастом до 250 лет. Дубы, произрастающие в нижней части склонов и по тальвегу балок, имеют высоту более 30 м, подгонными породами выступают клен остролистный, ясень обыкновенный, липа мелколистная и клен полевой. На различных участках лесных культур находятся опыты по влиянию разных типов рубок на состояние дубового древостоя. Площадка наблюдения располагается в одной из наиболее продуктивных частей насаждения и находится в 24 выделе 36 квартала.

Объект “Козловская ЛД” (50.971120° с.ш., 44.345609° в.д.) располагается в Руднянском р-не Волгоградской обл. Пробные площади находятся в центральной части массивного лесного насаждения, которое представляет собой одну из т. н. “Генковских” лесополос, посаженную в начале XX в. по проекту лесовода Н.К. Генко. Насаждение имеет форму ломаной линии, располагающейся на водоразделе рек Терсы и Щелкана. Протяженность лесополосы составляет около 7 км, ширина более 600 м. В середине XX в. большая часть лесополосы была вырублена, однако центральная часть массива была оставлена в качестве эталона. В составе древесного яруса доминирующее положение занимает клен остролистный, также встречаются дуб черешчатый и ясень обыкновенный.

Объект “Джаныбек” (49.396748° с.ш., 46.802071° в.д.) находится на территории Джаныбекского стационара Института лесоведения РАН, расположенного на государственной границе между Российской Федерацией и Республикой Казахстан, российская часть стационара относится к Палласовскому р-ну Волгоградской обл.

Стационар был создан в 1950-е гг. в качестве масштабного опыта по выращиванию лесных насаждений в условиях глинистой полупустыни северной части Прикаспийской низменности. В ходе работ были созданы разнообразные по конструкции и породному составу лесные культуры, многие из которых, несмотря на экстремальные условия, сохранились до настоящего времени (Сапанов, 2003). Пробная площадь находится на казахской части стационара на территории т.н. “Дендропарка на падине” – массивного насаждения, созданного в естественном понижении рельефа, имеющем более благоприятные почвенно-гидрологические условия для произрастания древесно-кустарниковой растительности. На пробной площади древостой представлен чистой культурой дуба черешчатого.

Объект “Баскунчак” (48.056326° с.ш., 46.896931° в.д.) находится в Ахтубинском р-не Астраханской обл. на участке “Зеленый сад” Государственного природного заповедника “Богдинско-Баскунчакский”. Насаждения представляют собой лесные культуры, созданные в 1930-е и 1960-е гг. на территории Богдинской опытной станции ВНИАЛМИ. Здесь изучался рост разнообразных древесных пород в полупустыне, проводились опыты по созданию лесополос разной конструкции, устойчивых к экстремальным климатическим условиям. Насаждения, в которых находятся пробные площади, представлены узкими лесополосами из вяза приземистого, на одной из площадок единично встречается дуб черешчатый. Вследствие конструкции лесных полос пробные площади имеют меньшие размеры, чем на более северных объектах.

Методы полевых работ. Для выбора мест закладки пробных площадей использовали метод ключевых участков. Обследование лесных насаждений проводили в три этапа: в камеральных условиях с использованием актуальных спутниковых снимков, на местности с использованием БПЛА для облета интересующей части насаждения, на местности маршрутным методом для наземного обследования выбранных участков. Выбирали наиболее представительные участки лесных массивов с усредненными для данной части объекта породно-возрастной структурой и жизненным состоянием древостоя. На выбранных таким образом ключевых участках выполняли отграничение постоянной пробной площади размером 50 × 50 м (0.25 га), для измерения углов и сторон пробной площади были использованы бус-соль геодезическая БГ-1 и мерные ленты, на местности углы закреплялись деревянными вешками, вдоль границ натягивался шпагат белого цвета. На пробных площадях определялись параметры древостоя методом сплошной перечислительной таксации. К измерениям принимали деревья с диаметром ствола на высоте 1.3 м ≥ 8 см,

для измерений использовали таксационную вилку Mantax-80. Высоты измеряли для выборки деревьев одной породы от 15 до 100% (в зависимости от количества деревьев), к измерениям принимались экземпляры разных ступеней толщины. Для измерений использовали ультразвуковой высотомер-угломер VERTEX-IV с переменной горизонтальной базой и отражателем.

На большей части пробных площадей также выполняли учет лесной подстилки. Сбор подстилки проводили в середине вегетационного сезона (июль–август) с использованием металлической рамки 50×50 см в 5-кратной повторности (по углам и в центре пробной площади). Собранные образцы высушивались до постоянной массы при температуре 105°C и взвешивали.

Метеорологическая информация, использованная для оценки климата и его изменений в регионе исследований, получена по ближайшей к каждому из объектов метеорологической станции сети Росгидромета при помощи интернет-ресурса “Погода и климат” (2022). Названия и коды ВМО метеостанций, включенных в анализ, таковы: Пенза (27962), Готня (34202), Новый Оскол (34213), Каменная Степь (34139), Урюпинск (34240), Рудня (34262), Эльтон (34476), Верхний Баскунчак (34579). Доступная метеоинформация включала среднемесячные температуры воздуха и месячные суммы осадков за период наблюдений, который по разным станциям составлял от 87 до 173 лет. Это дало возможность рассчитать средние годовые температуры и средние годовые суммы осадков для периодов, соответствующих климатическим нормам 1961–1990 и 1991–2020 гг., а также для интервала 2011–2020 гг., характеризующего климат в период между повторными обследованиями пробных площадей. Помимо средних значений температуры и осадков, для указанных временных интервалов были рассчитаны значения тренда, т.е. угла наклона линейной регрессии. Тренд показывает изменение параметра за один год.

Для совместной характеристики условий увлажнения и температуры был использован гидрометрический коэффициент Г.Т. Селянинова (ГТК). Этот коэффициент рассчитывается по уравнению (1):

$$K = 10R/\Sigma t, \quad (1)$$

где R – сумма осадков, мм; Σt – сумма среднесуточных температур. ГТК широко используется в агрономии для оценки климата и определения целесообразности выращивания тех или иных сельскохозяйственных культур. По величине ГТК выделяют следующие зоны: избыточного увлажнения (>1.3), обеспеченного увлажнения (1.0–1.3), засушливая (0.7–1.0), сухая (0.5–0.7), нужна ирригация (<0.5).

Обработку данных (вычисление средних значений, расчет запасов древесины, запасов углерода и т.д.) проводили в пакете Microsoft Office Excel 2010. Расчет запасов стволовой древесины выполнялся по формуле:

$$M = \Sigma GH_{\text{cp}} F_{\text{cp}}, \quad (2)$$

где M – объемный запас древесины, $\text{м}^3 \text{га}^{-1}$; ΣG – сумма площадей сечения, $\text{м}^2 \text{га}^{-1}$; H_{cp} – средняя высота, м; F_{cp} – среднее видовое число элемента леса, взятое по справочнику (Загребев и др., 1992).

Для расчета запасов углерода в фитомассе и сухостое использована система конверсионных коэффициентов “запас-фитомасса”, представленная в работе Д.Г. Замолотчикова и др. (1998). В этой системе коэффициент для конверсии объемного запаса стволовой древесины в фитомассу ствола представлен постоянным числом, а коэффициенты для ветвей, листвы и подземной фитомассы представлены степенными функциями от среднего диаметра и средней высоты. Порядок расчета включал: 1) выбор значения конверсионного коэффициента для ствола; 2) расчет конверсионных коэффициентов для ветвей, листвы, корней; 3) вычисление фитомассы каждой фракции по произведению объемного запаса древесины на соответствующий конверсионный коэффициент; 4) оценка суммарной фитомассы путем суммирования по фракциям. При расчете массы сухостоя использовался тот же подход, но фитомасса листвы была принята равной нулю. Расчет неопределенности базировался на стандартных ошибках конверсионных коэффициентов из работы Д.Г. Замолотчикова и др. (1998), дальнейшие вычисления вели в соответствии с правилами преобразования погрешностей. Для пересчета из сухой массы органического вещества в содержание углерода для всех фракций использован единый коэффициент 0.5.

При пересчете сухой массы подстилки в углерод использован типовой коэффициент 0.37 (Честных и др., 2007). Оценка неопределенности углерода подстилки проведена на основе стандартной ошибки средних значений.

Сравнение средних значений осуществляли по парному критерию Стьюдента. Перед тестом Стьюдента проводили проверку равенства дисперсий по критерию Фишера. Достоверность связей между переменными оценивали по значимости отличия коэффициента корреляции от нуля. Статистические проверки проводили в пакете Statsoft Statistica 10.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для всех рассматриваемых метеостанций климатическая норма 1991–2020 гг. характеризуется заметно более высокими температурами в срав-

Таблица 1. Характеристики климата и его изменения по метеостанциям региона исследования

Параметр	Период	Пенза	Готня	Новый Оскол	Каменная Степь	Урюпинск	Рудня	Эльтон	Верхний Баскунчак
Среднегодовая температура, °С	1961–1990	4.67	6.13	6.81	6.02	6.28	6.38	8.01	8.50
	1991–2020	5.90	7.36	7.80	7.33	7.59	7.46	9.10	9.66
	2011–2020	6.31	8.00	8.36	7.90	8.06	7.76	9.45	10.09
Тренд среднегодовой температуры, °С год ⁻¹	1961–1990	0.018	0.004	–0.007	0.004	0.003	0.004	0.006	0.001
	1991–2020	0.056	0.078	0.070	0.076	0.063	0.052	0.057	0.061
	2011–2020	0.107	0.150	0.155	0.152	0.105	0.103	0.117	0.101
Годовые осадки, мм	1961–1990	547.2	615.0	510.9	506.6	454.2	409.8	273.3	268.5
	1991–2020	547.6	596.9	521.7	508.1	422.8	428.7	260.3	276.7
	2011–2020	536.9	550.6	562.6	505.0	397.0	430.4	249.9	252.3
Тренд годовых осадков, мм год ⁻¹	1961–1990	–3.0	4.5	0.9	1.5	1.5	9.4	2.8	1.2
	1991–2020	–1.0	–3.3	–0.7	–0.5	–2.4	–0.1	–2.1	–2.0
	2011–2020	–17.9	0.8	–16.0	–11.2	–5.0	–2.7	–2.1	0.6
Коэффициент Селянинова за май–сентябрь	1961–1990	1.13	1.22	1.01	0.99	0.84	0.81	0.42	0.37
	1991–2020	1.03	1.11	1.04	0.91	0.78	0.74	0.36	0.36
	2011–2020	0.96	0.96	0.93	0.86	0.69	0.66	0.33	0.33
Тренд коэффициента Селянинова за май–сентябрь, год ⁻¹	1961–1990	0.004	–0.001	–0.004	0.002	–0.004	0.000	–0.001	0.004
	1991–2020	–0.001	–0.002	0.000	–0.003	0.000	–0.001	0.000	0.000
	2011–2020	–0.003	0.005	0.005	–0.007	0.000	–0.004	0.005	0.004

нении с нормой 1961–1990 гг. (табл. 1). Наибольшее отличие отмечено в Каменной степи и Урюпинске (1.31°С), наименьшее – в Новом Осколе (0.99°С), в среднем по всем станциям 1.18°С. Таким образом, в регионе присутствует общая тенденция к потеплению, причем оно идет в 2.5 раза быстрее, чем в целом по планете, где разница между климатическими нормами составила 0.48°С (Climate at glance ..., 2022). Тренды роста температуры для нормы 1961–1990 гг. невелики и варьируют от –0.007 до 0.018°С год⁻¹. Для нормы 1991–2020 гг. эти тренды составляют от 0.052 до 0.078°С год⁻¹, а для периода 2011–2020 гг. от 0.101 до 0.155°С год⁻¹. Такое изменение трендов означает, что скорость потепления увеличивается по мере приближения к современности, что хорошо известно и для других регионов планеты (Climate Change ..., 2021).

Изменения годовых сумм осадков между климатическими нормами более разнообразны, чем температуры. Отмечены как уменьшения осадков (например, по станции Урюпинск с 454.2 до 422.8 мм), так и увеличения (например, по станции Рудня с 409.8 до 428.7 мм). В среднем по всем станциям годовая сумма осадков немного уменьшилась: с 448.2 мм в 1961–1990 гг. до 445.4 мм в 1991–2020 гг. Заметно более сухим периодом оказалось десятилетия 2011–2020 гг., в нем осадков в среднем по всем станциям было 435.6 мм. Поскольку для рассматриваемых станций характерны как увеличе-

ния, так и уменьшения осадков в сравнении по климатическим нормам, тренды осадков имеют как положительные, так и отрицательные значения. Наиболее высокие отрицательные тренды (до –17.9 мм год⁻¹) присутствуют в 2011–2020 гг., но и в этот период у некоторых станций отмечаются тренды к увеличению осадков (Готня, Верхний Баскунчак).

ГТК Селянинова по рассматриваемым станциям варьирует в высоких пределах: от 1.22 (обеспеченное увлажнение) до 0.33 (нужна ирригация). Среднее значение ГТК по станциям в 1961–1990 гг. составляло 0.85, а в 1991–2020 гг. 0.79. Десятилетие 2011–2020 гг. характеризуется самым малым средним значением ГТК (0.71). Добавим, что в это десятилетие гидротермические условия по станциям Пенза, Готня, Новый Оскол перешли из “обеспеченного увлажнения” в “засушливые”, а по станциям Урюпинск и Рудня из “засушливых” в “сухие”. Рост засушливости климата в последние десятилетия отмечается как для сельскохозяйственной зоны России в целом (Доклад об особенностях ..., 2022), так и для многих регионов юга Европейской России (Безуглова и др., 2015; Петров и др., 2016; Парфенова, Дашкевич, 2021; и др.). Отметим, что тренды ГТК для рассмотренных временных периодов для разных метеостанций могут быть как отрицательными, так и положительными. Более того, средний по всем станциям тренд ГТК за 2011–2020 гг. положителен (0.001 год⁻¹).

Доминирующие породы исследуемых лесных насаждений представлены в четырех случаях дубом черешчатым, в двух случаях кленом остролистным, по одному случаю липой мелколистной и вязом приземистым (табл. 2). На доминирующую породу приходилось от 47.2 до 100% запаса древесины, случаев смены доминирующей породы при повторных учетах отмечено не было. Средние высоты доминирующей породы варьировали от 6.9 м (объект “Баскунчак”, вяз приземистый, 2010 г.) до 37.6 м (объект “Шипов лес”, дуб черешчатый, 2015 г.). Как правило, высота доминирующей породы увеличивалась при повторных обследованиях, однако имеются и исключения, в частности, уменьшение средней высоты доминирующей породы отмечено на объекте “Каменная степь” (дуб, 37.6 м в 2015 г. и 35.7 в 2020 г.). Отмеченное снижение высоты не привело к снижению среднего диаметра (47.4 и 49.7 см соответственно). Максимальное увеличение средней высоты доминирующей породы (2.8 м) отмечено у дуба черешчатого на объекте “Шемякинская ЛД” за 2014–2019 гг.

Суммарный запас насаждений, как правило, увеличивался при повторных учетах. Максимальное пятилетнее увеличение запаса составило 80.6 м³ на “Шемякинской ЛД” за 2014–2019 гг., что соответствует чистому текущему приросту 16.1 м³ га⁻¹. Найденная величина выглядит слишком высокой, но она согласуется с уже упомянутым увеличением средней высоты и среднего диаметра на этой пробной площади. Далее по величине пятилетнего изменения запаса следуют “Козловская ЛД” (26.1 м³ га⁻¹, 2010–2015 гг.), “Лес на Ворскле” (19.6 м³ га⁻¹, 2014–2019 гг.), “Козловская ЛД” (15.3 м³ га⁻¹, 2015–2020 гг.). На других ПП были зарегистрированы заметные снижения суммарного запаса, в частности, в “Джаныбеке” (–50.8 м³ га⁻¹, 2010–2015 гг.), “Каменной степи” (–33.4 м³ га⁻¹, 2010–2015 гг.), “Баскунчаке” (–21.7 м³ га⁻¹, 2010–2015 гг.). Эти снижения могут быть связаны с неструктивными нарушениями, возникавшими в насаждениях за межучетный период. В частности, на “Баскунчаке” в июне 2014 г. произошел степной пожар, распространившийся и на лесные посадки, что привело к усилению отпада деревьев, выгоранию сухостоя и подстилки.

Запасы углерода фитомассы древостоя варьируют между исследованными объектами (табл. 3) от 38.5 ± 7.4 т С га⁻¹ (“Джаныбек”, 2015 г.) до 270.6 ± 52.8 т С га⁻¹ (“Каменная степь”, 2010 г.). Отношение между максимальным и минимальным значением углерода фитомассы древостоя близко к 7. В научной литературе имеется ряд оценок углерода древостоев в степной и лесостепной зонах ЕТР. В работе Ю.Г. Чендева и др. (2013) определены экосистемные запасы углерода (включая почву) в лесополосах трех ключевых участков:

Стрелецкая степь, Ямская Степь, Каменная степь. Запас углерода древостоя составил соответственно 69.9, 44.9, 116.2 т С га⁻¹. Эти оценки вполне укладываются в приводимый нами диапазон. Однако наше и цитируемое значение для Каменной степи различаются более чем в два раза. Причина связана с различием исходных вариантов закладки лесополос. В работе Н.Ф. Каплиной и Н.Ю. Кулаковой (2021) приводятся данные по двум вариантам нагорных дубрав в Теллермановском лесничестве Воронежской обл. Надземная фитомасса снытево-осоковой дубравы составляла 105 т С га⁻¹, а солонцевой всего 14.5 т С га⁻¹. В цитируемой работе основой оценки фитомассы являются сведения по оригинальным модельным деревьям, и степень подразделения фитомассы на фракции высока (например, для ствола это луб, заболонь, ядро, кора).

В работе В.И. Таранкова и Л.М. Степочкина (2005) использованы данные по 12 пробным площадям в культурах дуба Моховского лесничества Орловской обл., что обеспечило возможность построения “углеродной” таблицы хода роста. Согласно ей, максимального запаса углерода фитомассы (112–113 т С га⁻¹) культуры дуба достигают в возрасте 85–110 лет, а далее они постепенно снижают запас углерода до 93.4 т С га⁻¹ к возрасту 170 лет. Отметим серию работ молодых представителей Воронежской лесотехнической академии, в которых рассматривались углеродные характеристики лесополос, нагорных и байрачных дубрав в различных лесничествах и ООПТ Воронежской и Курской областей (Караванская, 2005; Свиридов, 2007; Шишкин, 2009; Терехов, 2012). Запасы углерода фитомассы древостоя согласно этим исследованиям были в пределах 60–150 т С га⁻¹ с приблизительной средней оценкой 100 т С га⁻¹. Из наших насаждений к цитируемым оценкам близки объекты “Пенза”, “Козловская ЛД”, “Джаныбек”.

В работе В.В. Мороза (2013) представлены запасы углерода в надземной фитомассе деревьев дуба для полезащитных степей Украины. Наличие детальных табличных данных позволяет применить их к нашей таксационной информации и сравнить оценки, полученные на основе альтернативных методик. Для “Пензы” (2010 г.) запас углерода надземной фитомассы насаждения по нашей оценке составил 121.8 ± 25.6 т С га⁻¹, по методу В.В. Мороза (2013) – 117.6 т С га⁻¹, для “Козловской ЛД” (2010 г.) – 121.1 ± 24.9 и 113.2 т С га⁻¹, для “Джаныбека” (2010 г.) – 106.7 ± 21.4 и 100.3 т С га⁻¹ соответственно. Следует отметить хорошее совпадение оценок. Осуществить проверку для других объектов не удалось, поскольку таблицы в работе В.В. Мороза (2013) заканчиваются на диаметре 30 см.

Таблица 2. Таксационные характеристики живой и сухостойной части древостоя на ПП

Объект; возраст древостоя при 1-м учете, лет	Год учета	Порода	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Густота, шт. га ⁻¹	Сумма G, м ² га ⁻¹	Запас, м ³ га ⁻¹	
Пенза 59	2011	Липа	21.0	20.2	540	18.70	178.5	
		Дуб	22.4	21.8	160	6.31	69.1	
		Ясень обыкн.	25.1	23.9	164	8.11	90.5	
		Клен острол.	17.9	20.1	168	4.23	40.2	
		Дуб сухой	14.6	19.5	40	0.67	6.6	
		Ясень сухой	12.7	12.0	16	0.20	1.2	
	2016	Липа	21.5	21.1	536	19.46	193.2	
		Дуб	22.4	21.6	108	4.26	51.5	
		Ясень обыкн.	26.0	22.5	160	8.49	89.6	
		Клен острол.	18.2	19.8	172	4.47	41.1	
		Дуб сухой	17.4	20.2	52	1.24	12.6	
		Ясень сухой	19.5	20.0	20	0.60	5.6	
		Липа сухая	14.8	20.0	4	0.07	0.7	
		Клен сухой	8.1	18.2	4	0.02	0.2	
		2020	Липа	22.4	21.0	544	21.44	211.7
			Дуб	26.1	22.8	84	4.49	46.2
	Ясень обыкн.		27.3	22.7	152	8.90	86.3	
	Клен острол.		18.4	19.3	176	4.68	42.4	
	Дуб сухой		16.8	20.3	76	1.68	15.7	
	Ясень сухой		15.9	16.5	28	0.56	4.1	
	Лес на Ворскле 380 (по дубу)	2014	Клен сухой	8.3	14.6	4	0.02	0.1
Клен острол.			34.2	27.6	222	20.39	255.9	
Дуб			102.3	35.2	10	8.22	135.4	
Липа			52.9	29.9	15	3.30	44.9	
Вяз			10.8	10.9	2	0.02	0.1	
Клен полевой			10.8	10.9	1	0.01	0.05	
Дуб сухой			99.5	35.2	4	3.11	51.5	
2019		Клен сухой	28.9	25.6	9	0.59	6.9	
		Клен острол.	33.8	28.0	230	20.64	265.5	
		Дуб	108.8	36.3	9	8.37	141.6	
		Липа	52.9	30.2	16	3.52	48.5	
		Вяз	9.6	12.0	2	0.01	0.1	
		Клен полевой	9.9	10.0	5	0.04	0.2	
		Дуб сухой	99.5	35.2	4	3.11	51.5	
Шипов лес 190–200 (по дубу)	2014	Клен сухой	48.2	32.8	5	0.91	13.6	
		Дуб	60.2	32.6	131	37.29	574.3	
		Клен полевой	12.4	14.9	189	2.28	16	
		Клен острол.	25.7	20.9	98	5.08	49.6	
		Груша	11.4	8.9	18	0.18	0.9	
		Липа	25.7	19.4	22	1.14	10.2	
		Ясень	18.5	21.9	4	0.11	1	
		Дуб сухой	49.2	31.3	15	2.85	41.1	
		Клен сухой	13.1	16.8	15	0.20	1.5	
		Груша сухая	9.6	8.5	7	0.05	0.2	

Таблица 2. Продолжение

Объект; возраст древостоя при 1-м учете, лет	Год учета	Порода	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Густота, шт. га ⁻¹	Сумма G, м ² га ⁻¹	Запас, м ³ га ⁻¹	
Каменная степь 107	2019	Дуб	61.2	32.8	127	37.36	580.3	
		Клен полевой	13.1	14.6	167	2.25	16.1	
		Клен острол.	25.8	20.1	109	5.70	54.4	
		Груша	12	9	11	0.12	0.6	
		Липа	27.2	16.8	11	0.64	5.1	
		Ясень	20.1	23.8	4	0.13	1.3	
		Дуб сухой	0	0	0	0.00	0	
		Клен сухой	8.8	10.5	0	0.00	0.4	
		Груша сухая	8	8.2	4	0.02	0.1	
	2010	Дуб	44.7	36.0	200	31.39	527.5	
		Клен острол.	19.6	18.8	360	10.86	97.9	
		Вяз	19.3	11.8	4	0.12	0.7	
		Дуб сухой	30.0	32.0	12	0.85	12.8	
		Клен сухой	14.9	16.5	12	0.21	1.7	
		2015	Дуб	47.4	37.6	152	26.82	468.5
			Клен острол.	20.7	22.4	348	11.71	123.6
			Вяз	18.1	11.8	4	0.10	0.6
			Дуб сухой	37.7	34.5	56	6.25	101.2
	Клен сухой		10.4	17.5	4	0.03	0.3	
2020	Дуб	49.7	35.7	144	27.94	465.9		
	Клен острол.	22.1	22.9	328	12.58	135.3		
	Вяз	0.0	0.0	0	0.00	0		
	Дуб сухой	36.8	34.0	4	0.43	6.8		
	Клен сухой	9.7	19.7	4	0.03	0.3		
Шемякинская ЛД 105-120	2014	Дуб	51.5	34.3	157	32.70	528.1	
		Липа	36.9	27.8	11	1.18	14.5	
		Клен острол.	13.2	20.3	4	0.05	0.5	
		Дуб сухой	39.5	29.3	4	0.49	6.1	
	2019	Дуб	54.6	37.1	150	35.12	607.5	
Липа		37.7	28.6	11	1.23	15.7		
Клен острол.		13.5	22.7	4	0.06	0.5		
Дуб сухой		40.2	36.8	7	0.89	7.7		
Козловская ЛД 106	2010	Клен острол.	28.9	22.6	444	29.13	308.3	
		Дуб	38.6	25.3	8	0.94	11.1	
		Клен сухой	19.9	20.2	64	1.99	15.9	
		Дуб сухой	28.3	18.5	4	0.25	2.2	
	2015	Клен острол.	30.0	24.7	412	29.12	333.7	
		Дуб	40.1	25.1	8	1.01	11.8	
		Клен сухой	20.5	22.4	64	2.11	23	
		Дуб	27.9	17.0	4	0.24	2	
	2020	Клен острол.	30.8	25.7	392	29.21	347.4	
		Дуб	42.0	26.1	8	1.11	13.4	
		Клен сухой	27.0	25.4	20	1.15	13.5	
		Дуб сухой	0.0	0.0	0	0.00	0	

Таблица 2. Окончание

Объект; возраст дровостоя при 1-м учете, лет	Год учета	Порода	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Густота, шт. га ⁻¹	Сумма G, м ² га ⁻¹	Запас, м ³ га ⁻¹
Джаныбек 50	2010	Дуб	22.8	14.4	1024	41.81	286.2
		Дуб сухой	17.3	13.5	256	6.02	98.5
	2015	Дуб	24.3	14.8	608	28.20	235.4
		Дуб сухой	18.1	14.2	400	10.29	138.5
Баскунчак 60	2010	Вяз призем.	18.5	6.9	624	16.77	109.3
		Вяз сухой	11.6	4.1	320	3.38	10.5
	2015	Вяз призем.	19.0	8.4	900	25.52	87.6
		Вяз сухой	16.3	7.7	571	11.92	35.1
	2020	Вяз призем.	21.2	8.8	643	22.70	91.1
		Вяз сухой	15.0	7.8	700	12.37	21.5

Таблица 3. Запасы углерода в дровостое и подстилке на ПП

Объект	Год учета	Запас углерода, т С га ⁻¹			
		дровостой			подстилка
		живой	сухостой	итого	
Пенза	2011	155.8 ± 29.0	4.2 ± 0.5	160.0 ± 29.5	5.2 ± 0.3
	2016	151.0 ± 28.6	9.6 ± 1.6	160.6 ± 30.2	3.2 ± 0.5
	2020	152.7 ± 29.2	10.3 ± 1.7	163.0 ± 30.9	3.4 ± 0.8
Лес на Ворскле	2014	176.7 ± 36.1	22.0 ± 4.9	198.7 ± 41.0	NA
	2020	184.8 ± 37.7	24.5 ± 5.5	209.3 ± 43.2	NA
Шипов лес	2014	261.0 ± 54.9	17.6 ± 3.6	278.6 ± 58.5	NA
	2019	262.9 ± 55.4	0.3 ± 0.0	263.2 ± 55.5	NA
Каменная степь	2010	270.6 ± 52.8	6.8 ± 0.9	277.3 ± 53.8	7.3 ± 0.1
	2015	257.4 ± 50.0	44.7 ± 8.6	302.0 ± 58.6	7.0 ± 0.9
	2020	257.0 ± 50.7	3.2 ± 0.6	260.2 ± 51.3	7.6 ± 1.4
Шемякинская ЛД	2014	219.9 ± 45.6	2.6 ± 0.5	222.5 ± 46.1	NA
	2019	251.8 ± 52.4	3.4 ± 0.6	255.2 ± 53.0	NA
Козловская ЛД	2010	141.0 ± 27.0	8.6 ± 1.2	149.6 ± 28.1	13.9 ± 1.9
	2015	153.0 ± 29.2	16.2 ± 2.9	169.2 ± 32.1	12.0 ± 1.7
	2020	159.5 ± 30.4	6.2 ± 1.1	165.7 ± 31.6	8.4 ± 0.3
Джаныбек	2010	126.9 ± 24.2	45.9 ± 6.3	172.8 ± 30.5	NA
	2015	103.0 ± 19.9	65.4 ± 11.7	168.4 ± 31.6	NA
Баскунчак	2010	47.7 ± 9.2	4.7 ± 0.7	52.4 ± 9.9	4.5 ± 0.2
	2015	38.5 ± 7.4	15.9 ± 3.0	54.4 ± 10.4	2.1 ± 0.6
	2020	39.2 ± 7.7	9.9 ± 1.8	49.2 ± 9.5	1.5 ± 0.4

Примечание: NA – определений не было.

Запасы углерода в сухостое исследованных объектов варьируют от 0.29 ± 0.04 (“Шипов лес”, 2020 г.) до 65.4 ± 11.7 (“Джаныбек”, 2015 г.) т С га⁻¹ (табл. 3), т.е. отношение между минимальным и максимальным значением составляет 224. Высокая вариабельность запасов углерода сухостоя в значительной степени контролируется антропо-

генным воздействием, поскольку очистка леса от сухостойных деревьев проводится организациями, осуществляющими управление лесными насаждениями. В частности, снижение запаса сухостоя в “Шиповом лесу” от 2014 к 2019 г. произошло в результате прочистки 2019 г., осуществленной участковым лесничеством. Сходная ситуация имела

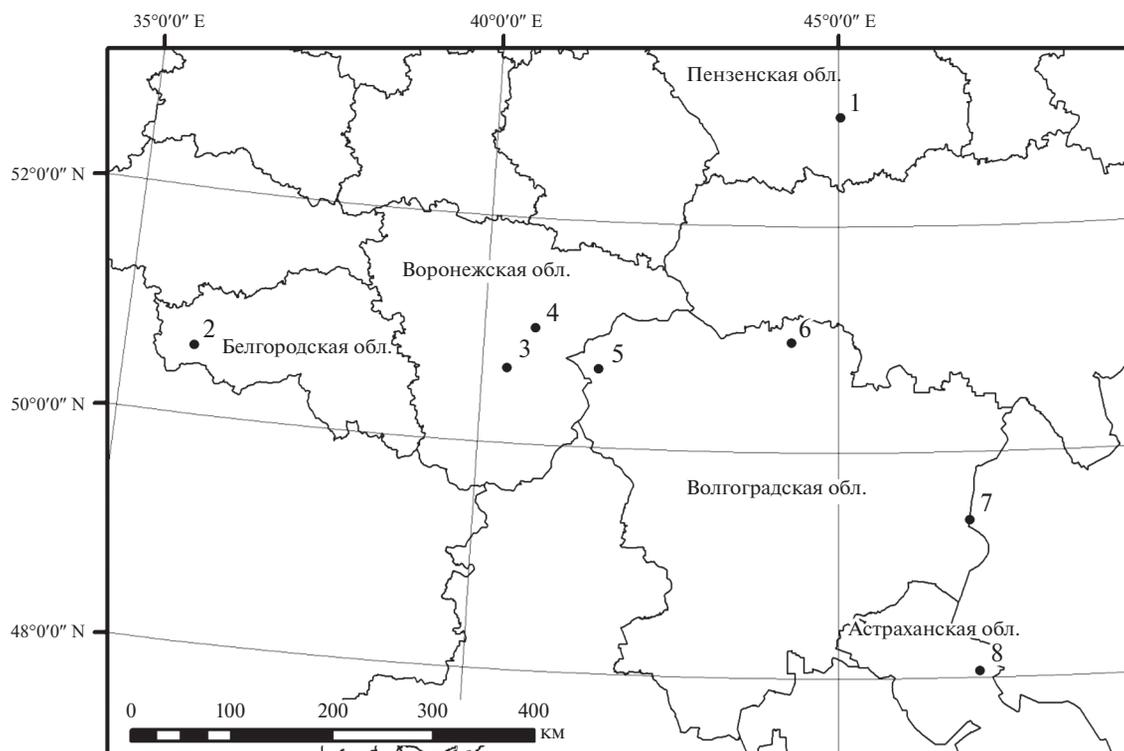


Рис. 1. Схема расположения объектов исследования. (1) Пенза, (2) Лес на Ворскле, (3) Каменная степь, (4) Шипов лес, (5) Шемякинская ЛД, (6) Козловская ЛД, (7) Джаныбек, (8) Баскунчак.

место и в “Каменной степи” в период 2015–2020 гг. В то же время отмечаются и заметные увеличения запаса углерода сухостоя, например, “Каменная степь”, 2010–2015 гг., “Баскунчак”, 2010–2015 гг. Эти ситуации, как правило, связаны с гибелью части древостоя в результате нарушения, например, пожара. Доля углерода сухостоя от суммарного (с сухостоем) запаса углерода древостоя варьирует от 0.1 до 38.8%, в среднем составляя 10.4%. Согласно данным Национального кадастра парниковых газов (Национальный доклад ..., 2022), доля углерода мертвой древесины от суммы живого древостоя и мертвой древесины составляет в Воронежской обл. 16.9%, в Пензенской обл. 17.6%, в Волгоградской обл. 14.6%. Цитируемые значения вполне сопоставимы с приводимыми в настоящей статье, если учесть, что первые включают и углерод валежной древесины.

К сожалению, авторам статьи удалось организовать определения запасов подстилки лишь на четырех исследовательских объектах (табл. 3). Содержание углерода варьировало по объектам от 1.5 ± 0.4 т С га⁻¹ (“Баскунчак”, 2020 г.) до 13.9 ± 1.9 т С га⁻¹ (“Козловская ЛД”, 2010 г.). Вполне сопоставимы с указанными оценки запаса углерода подстилки (в перерасчете из массы в углерод), проведенные другими авторами: 5.1–6.3 т С га⁻¹ в дубравах Воронежской обл. (Каплина, Кулакова, 2021) и 1.6–7.1 т С га⁻¹ в дубравах Орловской обл.

(Таранков, Степочкин, 2005). Несколько меньший диапазон 0.8–2.5 т С га⁻¹ найден для других вариантов нагорных и пойменных дубрав Воронежской обл. (Караванская, 2005).

Средние по четырем объектам значения углерода подстилки убывают с каждым последовательным учетом: 7.7 (2010 г.), 6.1 (2015 г.), 5.2 (2020 г.) т С га⁻¹. Отмеченные различия не являются статистически значимыми в связи с малым объемом выборки. Во многих источниках отмечается, что именно углеродный пул подстилки наиболее быстро реагирует на изменения климата (Berg, McLaugherty, 2020; Столбовой, 2022). При этом для бореальных лесов модели прогнозируют заметное уменьшение пула подстилки за счет активизации разложения при увеличении температуры. В то же время исследования полуаридных местообитаний показывают, что уменьшение осадков оказывается более существенным, чем увеличение температуры, и приводит к увеличению пула подстилки (Prieto et al., 2019). Наши данные по динамике запасов подстилок не вполне укладываются в типовую картину, поскольку тренд на аридизацию присутствует, но запасы подстилки демонстрируют тенденцию к уменьшению. Это противоречие создает интересный аспект для будущих исследований.

Рассмотрим зависимости запаса углерода фитомассы древостоя от ключевых климатических

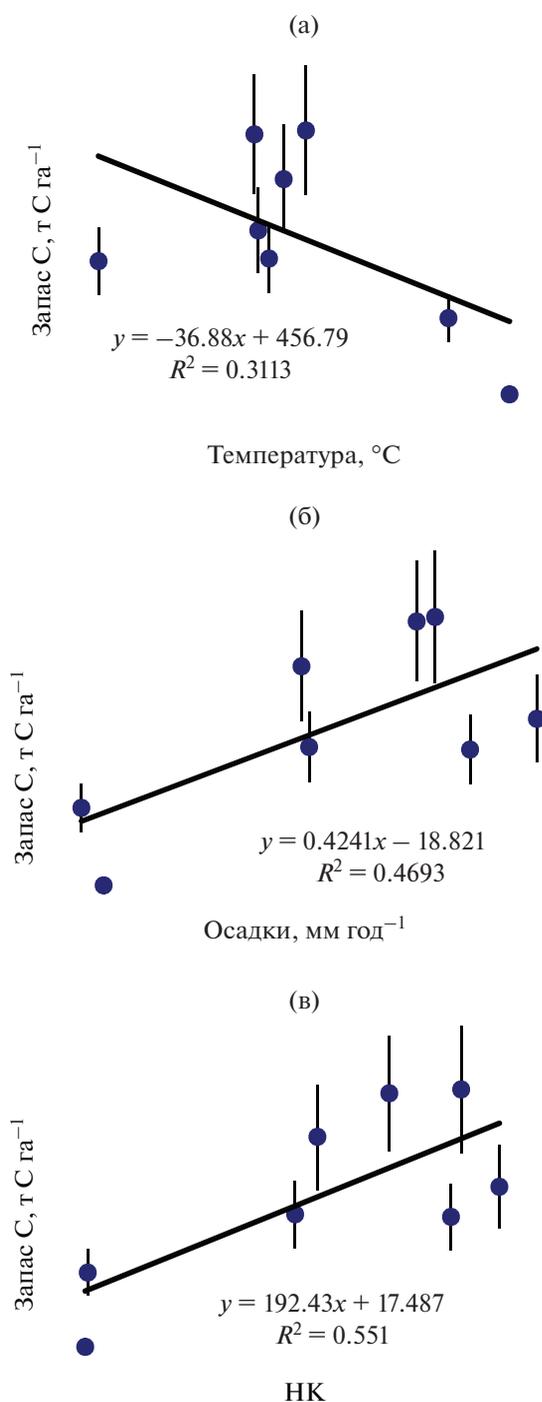


Рис. 2. Связь углерода фитомассы древостоя исследованных объектов с климатическими параметрами: (а) – среднегодовой температурой; (б) – годовой суммой осадков; (в) – ГТК по Г.Т. Селянину за май–сентябрь.

факторов. Для этого сравним углерод древостоя по состоянию на 2014–2016 гг. (этот временной срез включает данные по всем объектам) с климатическими условиями за 1991–2020 гг. (рис. 2). Связь углерода фитомассы с температурой отри-

цательна, но статистически незначима ($P = 0.15$). В рассматриваемой зоне увеличение температуры ведет к уменьшению влагообеспеченности и увеличению проблем с транспортом воды в кроны высоких деревьев. Вполне логично, что связь углерода фитомассы с осадками положительная, поскольку увеличение осадков увеличивает влагообеспеченность. Однако эта связь тоже статистически незначима. Отсутствие значимости связи углерода фитомассы с температурой и осадками определяется небольшим объемом выборки, а также значительной долей необъясненной дисперсии, формируемой, в частности, эдафическими условиями (нагорные и пойменные дубравы, искусственные насаждения на ранее безлесных участках) и другими факторами (возраст и породный состав лесного насаждения, различия в воздействии среднегодовых и сезонных погодных параметров). Наиболее тесная положительная связь углерода фитомассы отмечена с ГТК, характеризующим совместное действие температуры и осадков во влагообеспеченности растений. Эта связь оказывается статистически значимой ($P = 0.035$) даже для имеющейся выборки.

Выявлению климатических зависимостей фитомассы деревьев дуба посвящена работа В.А. Усольцева и др. (2020). Основу для анализа представила большая выборка (500) модельных деревьев дуба из России, Венгрии, Болгарии, Чехии, Украины, Японии. Построены нелинейные регрессионные уравнения, включающие в качестве независимых переменных не только климатические, но и т.н. структурные переменные, то есть параметры дерева, а именно возраст, диаметр ствола и высоту. Показано, что в умеренно сухих районах (годовая сумма осадков около 400 мм) увеличение температуры приводит к увеличению фитомассы. Этот вывод не согласуется с результатом нашего исследования (рис. 2а), а авторы цитируемой работы сами отмечают отсутствие соответствия с ранее построенными моделями для хвойных древесных пород (Усольцев и др., 2019; Usoltsev et al., 2019). Добавим, что в обсуждаемой работе независимой переменной служит средняя температура января, в то время как согласно нашим данным по станциям средняя январская температура статистически не связана со среднегодовой температурой ($P = 0.21$).

Примененный выше подход к описанию величин запасов фитомассы как функции климатических параметров вполне традиционен и используется во множестве исследований. Существенно более редки попытки выявить изменение фитомассы древостоев под действием идущих климатических изменений. Для решения этой задачи было проведено сравнение пятилетних изменений углерода фитомассы в последовательных учетах (например, изменение от 2010 к 2015 г., или от 2014 к 2019 г.) с трендами климатических пара-

метров, то есть коэффициентами при независимой переменной в линейном регрессионном уравнении. Как и в случае с фитомассой, в анализ включили среднегодовую температуру, годовую сумму осадков и ГТК за май–сентябрь. Сразу отметим, что ни одна из рассмотренных связей не была статистически значимой (P от 0.112 до 0.823), потому строгий вывод из проведенного анализа состоит в том, что достоверных воздействий изменения климата на запас углерода древостоя найти не удалось. Однако полученные графические представления данных все же заслуживают обсуждения.

Можно отметить слабую сопряженность снижения углерода фитомассы с повышением температуры (рис. 3а). Эта ситуация вполне соответствует обнаруженной для зависимости углерода фитомассы от температуры (рис. 2а), более того, даже коэффициенты регрессионных уравнений достаточно близки. Сопряженность изменений углерода фитомассы с изменением осадков выглядит необычно (рис. 3б): уменьшение осадков (именно этот вариант изменения осадков преобладает) приводит к изменению фитомассы в сторону увеличения. Эта сопряженность полностью противоположна представленной на рис. 2а. Наконец, изменения углерода фитомассы и изменения ГТК не демонстрируют никакой сопряженности (рис. 3в). Возможные объяснения найденных антиинтуитивных сопряженностей могут быть связаны с более сложными зависимостями изменений фитомассы от погодных условий, в которых могут быть вовлечены внутрисезонные взаимодействия.

Кроме того, важный аспект связан с высокой устойчивостью лесов (по сравнению с другими типами экосистем) к поддержанию своих функций на фоне изменений внешних условий (Пузаченко, Скулкин, 1981; Пузаченко, Сандлерский, 2009; и др.). Отсутствие значимых сопряженностей между изменениями фитомассы и изменениями климатических параметров означает, что последние не выходят за пределы вариаций, которые могут быть сглажены механизмами саморегуляции лесных экосистем. Нужны либо более длительные (в сравнении с рассмотренным пятилетним периодом), либо более масштабные по амплитуде климатические изменения, например, длительные засухи. В частности, в Баргузинской котловине в 2016 г. была зарегистрирована гибель лесополос из сосны обыкновенной и тополя бальзамического после длительной засухи 2015 г. (Убугунов и др., 2017). В Северном Прикаспии период 2000–2009 гг. оказался крайне неблагоприятен для лесовыращивания из-за теплых зим, повторяющихся засух, уменьшения общего количества снега, что привело к массовому усыханию лесных культур (Сапанов, Сиземская, 2020).

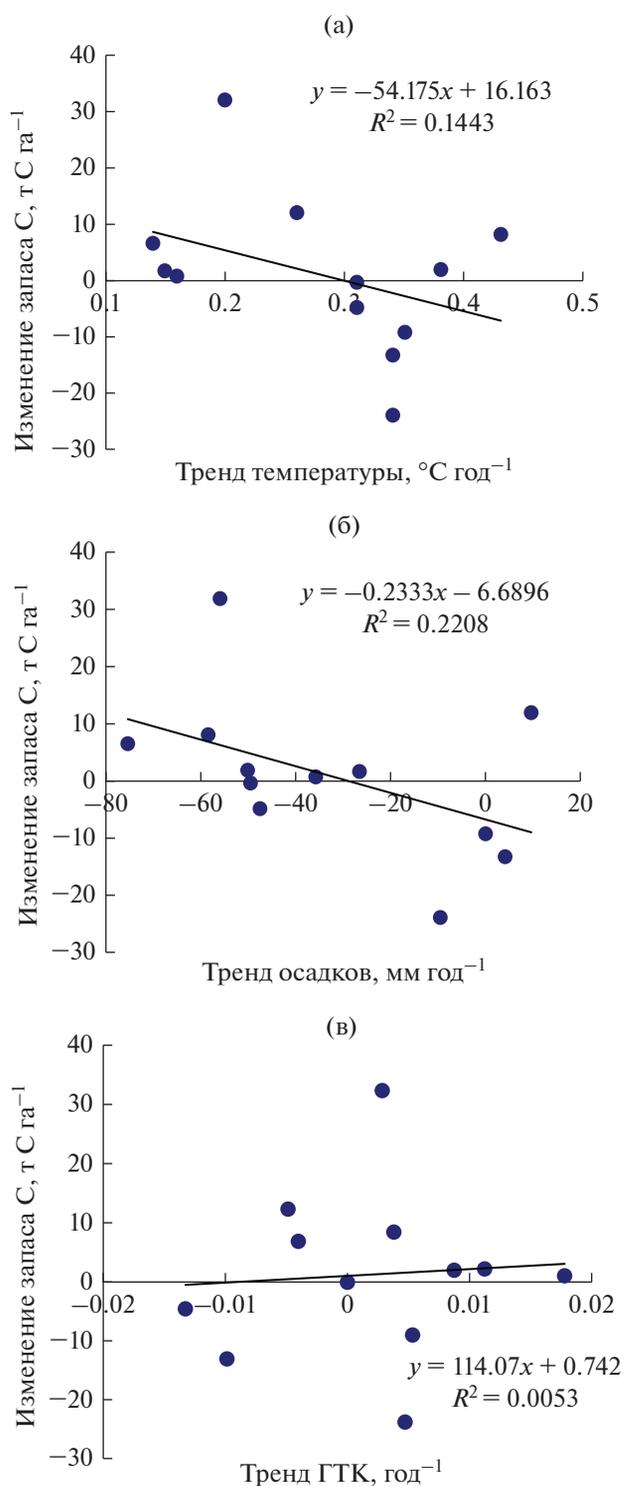


Рис. 3. Связь изменения углерода фитомассы древостоя исследованных объектов с изменением климатических параметров: (а) – среднегодовой температуры; (б) – годовой суммы осадков; (в) – ГТК по Г.Т. Селянину за май–сентябрь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные климатические изменения усиливают свои проявления. В исследуемом регионе, охватывающим лесные насаждения в Пензенской, Белгородской, Воронежской, Волгоградской и Астраханской областях, рост среднегодовой температуры воздуха от нормы 1961–1990 гг. к норме 1991–2020 гг. составил 1.13°C , что в 2.5 раза больше, чем в среднем по планете. Годовые суммы осадков при этом уменьшились с 448.2 мм до 445.4 мм. Среднее значение гидротермического коэффициента Г.Т. Селянинова за май–сентябрь в 1961–1990 гг. составляло 0.85, а в 1991–2020 гг. — 0.79. Запас углерода фитомассы древостоя в исследованных лесных насаждениях варьировал от $38.5 \pm 7.4 \text{ т С га}^{-1}$ до $270.6 \pm 52.8 \text{ т С га}^{-1}$. При повторных обследованиях, проведенных раз в 4–5 лет (2010–2011, 2014–2015, 2019–2020 гг.) были выявлены как увеличения, так и уменьшения запасов углерода фитомассы, составлявшие за пятилетний интервал от -23.8 до 31.9 т С га^{-1} . Сравнение запасов углерода фитомассы с климатическими характеристиками выявило статистически достоверную связь с ГТК за май–сентябрь. Однако сравнение изменений фитомассы с изменениями среднегодовой температуры, годовых осадков и ГТК за май–сентябрь не выявило значимых зависимостей. Вероятно, отсутствие значимых связей определяется устойчивостью лесных экосистем, обеспечивающей сохранение их функций на временных интервалах в несколько лет.

Благодарности. Авторы выражают благодарность кандидату биологических наук О.В. Честных (Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова) за участие и помощь в проведении полевых работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Безуглова О.С., Голозубов О.М., Полуян Д.И. Региональные особенности процессов опустынивания в Ростовской области // Аридные экосистемы. 2015. Т. 21. № 1 (62). С. 17–21.
- Бугаев В.А., Мусиевский А.Л. Шипов лес. История и современность // Лесное хозяйство. 2000. № 5. С. 22–24. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 г. М.: Росгидромет, 2022. 104 с.
- Загреев В.В., Сухих В.И., Швиденко А.З., Гусев Н.Н., Мошкалев А.Г. Общесоюзные нормативы для таксации лесов. М.: Колос, 1992. 495 с.
- Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Коровин Г.Н. Определение запасов углерода по зависимым от возраста насаждений конверсионно-объемным коэффициентам // Лесоведение. 1998. № 3. С. 84–93.
- Каганов В.В. Изменение экосистемных запасов углерода при облесении в степной и полупустынной зонах Европейской части России // Проблемы региональной экологии. 2012. № 4. С. 7–12.
- Каплина Н.Ф., Кулакова Н.Ю. Фитомасса и запасы углерода и азота в контрастных по продуктивности нагорных дубравах южной лесостепи // Аридные экосистемы. 2021. Т. 27. № 1 (86). С. 35–42.
- Караванская Н.В. Биоразнообразие и потоки углерода в дубравах Центральной лесостепи. Автореф. дис. ... канд. сельхоз. наук. Воронеж, ВГЛТА, 2005. 20 с.
- Карандина С.Н. Растительность стационара в липово-дубовом лесу // Ученые записки ЛГУ. 1949. Т. 2. Вып. 19 (№ 92). С. 13–36.
- Мороз В.В. Определение надземных компонентов фитомассы и накопления углерода в полезащитных дубовых лесополосах Украины // Лесохозяйственная информация. 2013. № 1. С. 26–29.
- Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2019 гг. Часть 2. М., 2022. 111 с.
- Парфенова А.В., Дашкевич Л.В. Аридизация климата Ростовской области // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2021. Т. 1. № 6. С. 131–138.
- Петров К.М., Бананова В.А., Лазарева В.Г., Унагаев А.С. Региональные особенности глобального процесса опустынивания в Северо-Западном Прикаспии // Биосфера. 2016. Т. 8. № 1. С. 49–62.
- Погода и климат. 2022. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/> (дата обращения: 21.11.2022)
- Пузаченко Ю.Г., Скулкин В.С. Структура растительности лесной зоны СССР. Системный анализ. М.: Наука, 1981. 276 с.
- Рыжков О.В. Состояние и развитие дубрав Центральной лесостепи (на примере заповедников Центрально-Черноземного и “Лес на Ворскле”). Тула: Гриф и К, 2001. 182 с.
- Сандлерский Р.Б., Пузаченко Ю.Г. Термодинамика биогеоценозов на основе дистанционной информации // Журн. общей биологии. 2009. Т. 70. № 2. С. 121–142.
- Сапанов М.К. Экология лесных насаждений в аридных регионах. Тула: Гриф и К, 2003. 248 с.
- Сапанов М.К., Сиземская М.Л. Климатогенные ограничения аридного лесовыращивания // Лесоведение. 2020. № 1. С. 46–54.
- Свиридов Д.Г. Депонирование углерода дубовыми насаждениями Центрального Черноземья. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Воронеж, ВГЛТА, 2007. 19 с.
- Столбовой В.С. Влияние потепления климата на баланс углерода в лесных почвах России // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2022. Вып. 111. С. 5–29. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-111-5-29>
- Таранков В.И., Степочкин Л.М. Особенности депонирования углерода культурами дуба черешчатого Моховского лесничества Орловской области // Лесоведение. 2005. № 6. С. 38–43.
- Терехов В.И. Эколого-лесоводственные основы повышения углероддепонирующей функции байрачных дубрав Курской област.и Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Воронеж, ВГЛТА, 2012. 19 с.
- Убузунов В.Л., Гунин П.Д., Бажа С.Н., Дробышев Ю.И., Убузунова В.И. Иссущение почв как показатель опустынивания лесостепных экосистем Баргузинской котловины // Аридные экосистемы. 2017. Т. 23. № 3 (72). С. 17–31.

Усольцев В.А., Ковязин В.Ф., Цепордей И.С. Увеличение вклада климатических переменных в объяснение изменчивости биомассы деревьев дуба на территории Евразии в связи с отклонением модели от аллометрии // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020. № 233. С. 39–59.

Усольцев В.А., Цепордей И.С., Часовских В.П. Фитомасса деревьев двухвойных сосен Евразии: аддитивные модели в климатических градиентах // Сибирский лесной журн. 2019. № 1. С. 44–56.

Чендев Ю.Г., Соэр Т.Д., Холл Р.Б., Петин А.Н., Новых Л.Л., Заздравных Е.А., Чевердин Ю.И., Тищенко В.В., Филатов К.И. Оценка запасов и баланса органического углерода в экосистемах лесополос Восточно-Европейской лесостепи // Проблемы региональной экологии. 2013. № 4. С. 7–14.

Честных О.В., Лыжин В.А., Кокшарова А.В. Запасы углерода в подстилках лесов России // Лесоведение. 2007. № 6. С. 114–121.

Шишкин А.И. Особенности структурно-функциональной организации дубрав центральной лесостепи. Автореф. дис. ... канд. сельхоз. наук. Воронеж, ВГЛТА, 2009. 18 с.

Berg B., McLaugherty C. Plant Litter. Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration. Fourth Edition. Switzerland: Springer Nature, 2020. 342 p.

Climate at a Glance: Global Time Series. NOAA National Centers for Environmental information, 2002. URL: // www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/time-series (дата обращения: 21.11.2022)

Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021. 32 p.

Mátyás C., Sun G. Forests in a water limited world under climate change // Environmental Research Letters. 2014. V. 9. Paper No. 085001. 10 p.

Prieto I., Almagro M., Bastida F., Querejeta J. Altered leaf litter quality exacerbates the negative impact of climate change on decomposition // J. Ecology. 2019. V. 107. P. 2364–2382.

Usoltsev V.A., Zukow W., Osmirko A.A., Tsepordey I.S., Chasovskikh V.P. Additive biomass models for *Larix* spp. single-trees sensitive to temperature and precipitation in Eurasia // Ecological Questions. 2019. V. 30 (2). P. 57–67.

Valentini R., Zamolodchikov D., Reyer C., Noce S., Santini M., Lindner M. Climate change in Russia – past, present and future // Russian Forests and Climate Change. What Science Can Tell Us 11. European Forest Institute, 2020. P. 45–52.

Climate Affecting the Carbon, Phytomass and Litter Stocks in Forest Stands of the South of the European Russia

V. V. Kaganov^{1, *}, D. G. Zamolodchikov^{1, 2}, and A. S. Mostovaya¹

¹Center for Forest Ecology and Productivity of the RAS, Profsoyuznaya st., 84/32, bldg. 14, Moscow, 117997 Russia

²High School of Economy, Pokrovsky blvd, 11, Moscow, 109028 Russia

*E-mail: saganss@rambler.ru

Modern global climate change manifests in an ever intensifying fashion, affecting anthropogenic and natural systems. Bioclimatic models predict significant shifts in biome boundaries, including a reduction in the forests' proportion in the forest-steppe areas. This process can also affect carbon stocks. The aim of the work was to assess the impact of climate and its changes on the values and their changes of the phytomass' carbon stocks of forest stands according to the data of repeated surveys of permanent sample plots. In the southern regions of the European Russia, 8 forests were selected and trial plots were set up. Repeated surveys were carried out on the test plots in 2010–2011, 2014–2015, 2019–2020. The carbon reserves of the living and the dead components of forest stands were calculated according to taxation characteristics. The litter carbon stocks were determined by the gravimetric method. The meteorological information analysis was carried out using data from the meteorological stations closest to the objects of study. Average annual temperature for 1991–2020 increased compared to 1961–1990. by 1.13°C, which is 2.5 times more than the global average. At the same time, annual precipitation decreased from 448.2 mm to 445.4 mm. The average value of the G.T. Selyaninov's hydrothermal coefficient for May–September during the 1961–1990 period was 0.85, and 0.79 during the 1991–2020 period. The stock of the phytomass carbon in the studied forest stands varied from $38.5 \pm 7.4 \text{ t C ha}^{-1}$ to $270.6 \pm 52.8 \text{ t C ha}^{-1}$. Repeated surveys revealed both increases and decreases in phytomass carbon stocks, which ranged from -23.8 to 31.9 t C ha^{-1} over a five-year interval. The phytomass carbon stocks and climatic characteristics analysis revealed a statistically significant correlation with the HTC for May–September. However, comparison of changes in phytomass with changes in the average annual temperature, annual precipitation and HTC for May–September did not reveal significant dependencies. The absence of significant correlations between changes in phytomass carbon and climatic parameters' changes can be determined by the forest ecosystems' stability, which ensures the preservation of their functions over several years intervals.

Keywords: forest crops, shelter belts, highland oak forests, carbon stock, phytomass, dead wood, forest litter, climate change.

Acknowledgements: The work has been carried out with the financial support from the RSF grant № 22-27-00641 "Climate's impact on the large-scale forest growing in arid areas of Russia".

REFERENCES

- Berg B., McClaugherty C., *Plant Litter. Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration*, Switzerland: Springer Nature, 2020, 342 p.
- Bezuglova O.S., Golozubov O.M., Poluyan D.I., Regional'nye osobennosti protsessov opustynivaniya v Rostovskoi oblasti (Regional features of desertification processes in Rostov oblast'), *Aridnye ekosistemy*, 2015, Vol. 21, No. 1 (62), pp. 17–21.
- Bugaev V.A., Musievskii A.L., Shipov les. Istoriya i sovremennost' (Shipov forest. History and the present time), *Lesnoe khozyaistvo*, 2000, No. 5, pp. 22–24.
- Chendev Y.G., Soer T.D., Khol R.B., Petin A.N., Novykh L.L., Zazdravnykh E.A., Cheverdin Y.I., Tishchenko V.V., Filatov K.I., Otsenka zapasov i balansa organicheskogo ugleroda v ekosistemakh lesopolos Vostochno-Evropeiskoi lesostepi (Estimation of stocks and balance of organic carbon in ecosystems of forest belts of the East European forest-steppe), *Problemy regional'noi ekologii*, 2013, No. 4, pp. 7–14.
- Chestnykh O.V., Lyzhin V.A., Koksharova A.V., Zapasy ugleroda v podstilkakh lesov Rossii (The carbon reserves in litters of forests in Russia), *Lesovedenie*, 2007, No. 6, pp. 114–121.
- Chishkin A.I., *Osobennosti strukturno-funktional'noi organizatsii dubrav tsentral'noi lesostepi. Avtoref. diss. kand. sel'khoz. nauk* (Features of the structural and functional organization of oak forests of the central forest-steppe. Extended abstract of Candidate's agric. sci. thesis), Voronezh: VGLTA, 2009, 18 p.
- Climate at a Glance: Global Time Series. NOAA National Centers for Environmental Information*, 2002, available at: <http://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/time-series> (November 21, 2022)
- Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Summary for Policymakers*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021. 32 p.
- Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2021 god* (Report on climate features in the Russian Federation for 2021), Moscow: Rosgidromet, 2022, 104 p.
- <http://www.pogodaiklimat.ru/> (November 21, 2022)
- Kaganov V.V., Izmenenie ekosistemnykh zapasov ugleroda pri oblesenii v stepnoi i polupustynnoi zonakh Evropeiskoi chasti Rossii (Changes in ecosystem carbon stocks in the afforestation of the steppe and semidesert zones of European Russia), *Problemy regional'noi ekologii*, 2012, No. 4, pp. 7–12.
- Kaplina N.F., Kulakova N.Y., Fitomassa i zapasy ugleroda i azota v kontrastnykh po produktivnosti nagornykh dubravakh yuzhnoi lesostepi (Phytomass and stocks of carbon and nitrogen in the upland oak groves contrasting in productivity in the southern forest-steppe), *Aridnye ekosistemy*, 2021, Vol. 27, No. 1 (86), pp. 35–42.
- Karandina S.N., Rastitel'nost' statsionara v lipovo-dubovom lesu (Vegetation of the station in the linden-oak forest), *Uchenye zapiski LGU*, 1949, Vol. 2, Issue 19 (No. 92), pp. 13–36.
- Karavanskaya N.V., *Bioraznoobrazie i potoki ugleroda v dubravakh Tsentral'noi lesostepi. Avtoref. diss. kand. sel'khoz. nauk.* (Biodiversity and carbon fluxes in oak forests of the Central Forest-Steppe. Extended abstract of Candidate's agric. sci. thesis), Voronezh: VGLTA, 2005, 20 p.
- Mátyás C., Sun G., Forests in a water limited world under climate change, *Environmental Research Letters*, 2014, Vol. 9, Paper No. 085001, 10 p.
- Moroz V.V., Opredelenie nadzemnykh komponentov fitomassy i nakopleniya ugleroda v polezashchitnykh dubovykh lesopolosakh Ukrainy (Modeling and identification of phytomass components and accumulation of carbon in shelterbelts of Ukraine), *Lesokhozyaistvennaya informatsiya*, 2013, No. 1, pp. 26–29.
- Natsional'nyi doklad o kadastrе antropogennykh vybrosov iz istochnikov i absorptsii poglotitelyami parnikovyykh gazov ne reguliruemyykh Monreal'skim protokolom za 1990–2019 gg.* (National report on the inventory of anthropogenic emissions from sources and removals by sinks of greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol for 1990–2019), Moscow, 2022, Part 2, 111 p.
- Parfenova A.V., Dashkevich L.V., Aridizatsiya klimata Rostovskoi oblasti (Aridization of the climate of the Rostov region), *Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Seriya: Sistemnyi analiz i modelirovanie ekonomicheskikh i ekologicheskikh sistem*, 2021, Vol. 1, No. 6, pp. 131–138.
- Petrov K.M., Bananova V.A., Lazareva V.G., Unagaev A.S., Regional'nye osobennosti global'nogo protsessа opustynivaniya v Severo-Zapadnom Prikaspii (Regional manifestation of global desertification in northwest Precaspian region), *Biosfera*, 2016., Vol. 8, No. 1, pp. 49–62.
- Prieto I., Almagro M., Bastida F., Querejeta J., Altered leaf litter quality exacerbates the negative impact of climate change on decomposition, *J. Ecology*, 2019, Vol. 107, pp. 2364–2382.
- Puzachenko Y.G., Skulkin V.S., *Struktura rastitel'nosti lesnoi zony SSSR* (Structure of vegetation in the forest zone of USSR), Moscow: Nauka, 1981, 276 p.
- Ryzhkov O.V., *Sostoyanie i razvitie dubrav Tsentral'noi lesostepi (na primere zapovednikov Tsentral'no-Chernozemnogo i "Les na Vorskle")* (State and development of oak forests of the Central forest-steppe (case study of the Central Chernozemny and "Forest on Vorskla" reserves)), Tula: Grif i K, 2001, 182 p.
- Sandlerskii R.B., Puzachenko Y.G., Termodinamika biogeotsenozov na osnove distantsionnoi informatsii (Thermodynamics of biogeocoenoses based on the remote sensing data), *Zhurnal obshchei biologii*, 2009, Vol. 70, No. 2, pp. 121–142.
- Sapanov M.K., *Ekologiya lesnykh nasazhdenii v aridnykh regionakh* (Ecology of wood plantings in arid regions), Tula: Grif i K, 2003, 248 p.
- Sapanov M.K., Sizemskaya M.L., Climatogenic restrictions of arid forestry, *Contemporary Problems of Ecology*, 2020, Vol. 13, No. 7, pp. 788–794.
- Stolbovoi V.S., Vliyanie potepleniya klimata na balans ugleroda v lesnykh pochvakh Rossii (Climate warming impact on the carbon balance in forest soils in Russia), *Byulleten' Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaeva*, 2022, Vol. 111, pp. 5–29.
- Sviridov D.G., *Deponirovanie ugleroda dubovymi nasazhdeniyami Tsentral'nogo Chernozem'ya. Avtoref. diss. kand. biol. nauk* (Carbon Sequestration by Oak Plantations in the Central Chernozem Region. Extended abstract of Candidate's biol. sci. thesis), Voronezh: VGLTA, 2007, 19 p.

- Tarankov V.I., Stepochkin L.M., Osobennosti deponirovaniya ugleroda kul'turami duba chereshchatogo Mokhovskogo lesnichestva Orlovskoi oblasti (Specific features of carbon deposition by *Quercus robur* plantations at the Mokhovskii forestry of Orel oblast), *Lesovedenie*, 2005, No. 6, pp. 38–43.
- Terekhov V.I., *Ekologo-lesovodstvennye osnovy povysheniya uglerododeponiruyushchei funktsii bairachnykh dubrav Kurskoi oblasti. Avtoref. diss. kand. biol. nauk* (Ecological and silvicultural bases for increasing the carbon sequestration function of ravine oak forests in the Kursk region. Extended abstract of Candidate's biol. sci. thesis), Voronezh: VGLTA, 2012, 19 p.
- Ubugunov V.L., Gunin P.D., Bazha S.N., Drobyshev Y.I., Ubugunova V.I., Issushenie pochv kak pokazatel' opustynivaniya lesostepnykh ekosistem Barguzinskoj kotloviny (Soil desiccation as an indicator of desertification of the forest-steppe ecosystems of the Barguzin depression), *Aridnye ekosistemy*, 2017, Vol. 23, No. 3 (72), pp. 17–31.
- Usol'tsev V.A., Kovyazin V.F., Tsepordei I.S., Uvelichenie vkladа klimaticheskikh peremennykh v ob'yasnenie izmenchivosti biomassy derev'ev duba na territorii Evrazii v svyazi s otkloneniem modeli ot allometrii (Increasing contribution of climate variables to the explanation of *Quercus* spp. single-tree biomass variability in Eurasia as related to model deviation from allometry), *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii*, 2020, No. 223, pp. 39–59.
- Usol'tsev V.A., Tsepordei I.S., Chasovskikh V.P., Fitomassa derev'ev dvukhvoinykh sosen Evrazii: additivnye modeli v klimaticheskikh gradientakh (Tree biomass of two-needled pines in Eurasia: additive models in climatic gradients), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2019, No. 1, pp. 44–56.
- Usoltsev V.A., Zukow W., Osmirko A.A., Tsepordey I.S., Chasovskikh V.P., Additive biomass models for *Larix* spp. single-trees sensitive to temperature and precipitation in Eurasia, *Ecological Questions*, 2019, Vol. 30 (2), pp. 57–67.
- Valentini R., Zamolodchikov D., Reyer C., Noce S., Santini M., Lindner M., Climate change in Russia – past, present and future, In: *Russian Forests and Climate Change. What Science Can Tell Us 11. European Forest Institute*, 2020, pp. 45–52.
- Zagreev V.V., Sukhikh V.I., Shvidenko A.Z., Gusev N.N., Moshkalev A.G., *Obshcheyuznyye normativy dlya taksatsii lesov* (All-Union norms of forest taxation), Moscow: Kolos, 1992, 494 p.
- Zamolodchikov D.G., Utkin A.I., Korovin G.N., Opre-delenie zapasov ugleroda po zavisimym ot vozrasta nasazhdenii konversionno-ob'emnym koeffitsientam (Determination of carbon stocks by age-dependent conversion-volume coefficients), *Lesovedenie*, 1998, No. 3, pp. 84–93.