

Научная статья

УДК 631.811:581.131:662.632:676.031.11

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-6-48-59


Сравнительные эколого-физиологические характеристики реакции семенных древостоев дуба (*Quercus robur* L.) на лесорастительные условия

В.М. Лебедев, д-р с.-х. наук, проф.; *ResearcherID:* [M-8699-2019](https://orcid.org/0000-0003-3316-854X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3316-854X>

Е.В. Лебедев , *д-р с.-х. наук, доц.;* *ResearcherID:* [G-9445-2019](https://orcid.org/0000-0002-5824-6981),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5824-6981>

Нижегородский государственный агротехнологический университет им. Л.Я. Флорентьева, просп. Гагарина, д. 97, г. Нижний Новгород, Россия, 603107; proximus39@mail.ru, proximus77@mail.ru 

Поступила в редакцию 11.07.24 / Одобрена после рецензирования 27.09.24 / Принята к печати 01.10.24

Аннотация. Проведен комплексный ретроспективный эколого-физиологический анализ табличных данных сухой массы древостоев рода *Quercus* возрастом от 10–20 до 140–200 лет с целью преобразования их в количественные показатели функционирования корневой системы, листового аппарата, чистой первичной продуктивности и депонирования углерода, адаптированные к экологическим условиям от широколиственных лесов Германии до юго-восточных пределов Русской равнины. Эколого-физиологические характеристики рассчитаны на 1 условное дерево сухой средней массы. Биологическая продуктивность определена по относительному увеличению средней сухой массы дерева в смежных возрастах. Количественные показатели минеральной продуктивности корневой системы установлены по методу В.М. Лебедева (адаптированному Е.В. Лебедевым к лесным древесным растениям), чистой продуктивности фотосинтеза – по А.А. Ничипоровичу. Выявлена отрицательная связь чистой продуктивности фотосинтеза, чистой первичной продукции и биологической продуктивности с возрастом растений и положительная – минеральной продуктивности с чистой продуктивностью фотосинтеза и биологической продуктивностью ($r = 0,863...0,998$ и $0,797...0,991$). Связь отношения корневого потенциала к фотосинтетическому и возраста растения оказалась высокой положительной ($r = 0,863...0,980$), а связь отношения корневого потенциала к фотосинтетическому с минеральной продуктивностью, чистой продуктивностью и биологической продуктивностью – высокой отрицательной. Связь минеральной продуктивности с возрастом растений отрицательна. Снижение поглотительной деятельности корней активизировало неспецифическую адаптивную реакцию, затрагивающую физиологические, функциональные и морфологические процессы, усиливающие подачу в надземные органы продуктов минерального питания, обеспечивающих фотосинтез и стабилизацию биологической продуктивности растения, а также в этих условиях показан перевод обменных процессов на уровне организма в онтогенезе на режим более эффективного использования азота при формировании биомассы для сохранения гомеостатического равновесия в биологической системе.

Ключевые слова: *Quercus*, минеральное питание, фотосинтез, чистая первичная продукция, депонирование углерода, уровень организма, онтогенез, европейский ареал дуба

Для цитирования: Лебедев В.М., Лебедев Е.В. Сравнительные эколого-физиологические характеристики реакции семенных древостоев дуба (*Quercus robur* L.) на лесораскательные условия // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 6. С. 48–59.
<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-48-59>

Original article

Comparative Ecological and Physiological Characteristics of the Response of Oak (*Quercus robur* L.) Seed Stands to Forest Growth Conditions

Valentin M. Lebedev, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [M-8699-2019](https://orcid.org/0000-0003-3316-854X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3316-854X>

Evgeny V. Lebedev✉, Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [G-9445-2019](https://orcid.org/0000-0002-5824-6981),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5824-6981>

Nizhny Novgorod State Florentyev Agrotechnological University, prosp. Gagarina, 97, Nizhny Novgorod, 603107, Russian Federation; proximus39@mail.ru, proximus77@mail.ru✉

Received on July 11, 2024 / Approved after reviewing on September 27, 2024 / Accepted on October 1, 2024

Abstract. A comprehensive retrospective ecological and physiological analysis of tabular data on the dry mass of stands of the genus *Quercus* aged from 10–20 to 140–200 years has been carried out in order to convert them into quantitative indices of the functioning of the root system, leaf apparatus, net primary productivity and carbon sequestration adapted to environmental conditions from the broad-leaved forests of Germany to the southeastern reaches of the Russian Plain. Ecological and physiological characteristics have been calculated for 1 conventional tree of average dry weight. Biological productivity has been determined by the relative increase in the average dry weight of a tree in adjacent ages. Quantitative indices of mineral productivity of the root system have been established using the method by V.M. Lebedev (adapted by E.V. Lebedev to forest woody plants), and net photosynthetic productivity has been established using the method by A.A. Nichiporovich. A negative relationship has been revealed between the net photosynthetic productivity, net primary production, biological productivity and plant age, and a positive one between mineral productivity, net photosynthetic productivity and biological productivity ($r = 0.863 \dots 0.998$ and $0.797 \dots 0.991$). The relationship between the ratio of root potential to photosynthetic potential and plant age has turned out to be highly positive ($r = 0.863 \dots 0.980$), while the relationship between the ratio of root potential to the photosynthetic potential and mineral productivity, net productivity and biological productivity has been highly negative. The relationship between mineral productivity and plant age has been negative. A decrease in the absorption activity of the roots has activated a non-specific adaptive response affecting physiological, functional and morphological processes that enhance the supply of mineral nutrients to the aboveground organs, ensuring photosynthesis and stabilizing the biological productivity of the plant. Under these conditions, a transfer of metabolic processes at the organism level during the ontogeny to a mode of more efficient use of nitrogen during the formation of biomass to maintain homeostatic equilibrium in the biological system has been demonstrated.

Keywords: *Quercus*, mineral nutrition, photosynthesis, net primary production, carbon sequestration, organism level, ontogeny, the European range of oak



For citation: Lebedev V.M., Lebedev E.V. Comparative Ecological and Physiological Characteristics of the Response of Oak (*Quercus robur* L.) Seed Stands to Forest Growth Conditions. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 6, pp. 48–59. (In Russ.).
<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-48-59>

Введение

Род *Quercus* входит в число лесообразующих для умеренных широт северного полушария [8]. Биологические особенности вида изучались в основном таксационно-физиологическими методами [3, 7–9, 11, 15–19, 21–23], затрагивалась преимущественно надземная часть растения, и лишь некоторые исследователи [5, 6, 10, 20] уделяли внимание корневой системе. Функционирование биологических процессов и их взаимосвязь у семенных древостоев на уровне организма практически не рассмотрены учеными, что лимитирует возможности управления продуктивностью таких древостоев. Для повышения результативности модельных и прогностических оценок продуктивности лесных фитоценозов необходимы количественные показатели функционирования листового аппарата и корневой системы для каждого лесообразующего вида в разных климатических зонах [12–14, 16, 20]. Существующие методы изучения биологической продуктивности лесных фитоценозов не позволяют выходить на уровень организма вследствие крайней сложности решаемой задачи. На основе таблиц хода роста (ТХР) древостоев и последующих разработок В.А. Усольцева, совместивших ТХР с данными о фитомассах древостоев Евразии [12–14], появилась возможность предложить ретроспективный комплексный эколого-физиологический метод [6] конвертации информации о фитомассах в показатели работы корневой системы, листового аппарата и биологической продуктивности на уровне организма в онтогенезе в конкретных экологических условиях.

Цель работы – получить на уровне организма количественные показатели 1) работы корневой системы и листового аппарата семенных насаждений дуба черешчатого (*Quercus robur* L.); 2) характера их взаимосвязи; 3) чистой первичной продукции; 4) депонирования углерода в различные возрастные периоды и 5) зон с повышенной продуктивностью на территории от Германии до юго-востока Русской равнины.

Объекты и методы исследования

Для получения сведений о сухой массе 1 растения (организма) табличные данные, приведенные В.А. Усольцевым [12] для 1 га, пересчитывали на 1 дерево средней массы – листья, сучья, стволы и корни. За длительность вегетации в регионах принят природный безморозный период, исключающий снижение активности фотосинтетического аппарата [2]. Чистую продуктивность фотосинтеза и фотосинтетический потенциал (ФП) определяли по методике А.А. Ничипоровича с учетом морфометрии и веса листьев дуба [1, 11]. Расчет активной поверхности корневой системы, корневого потенциала (КП) и установление минеральной продуктивности (МП) выполняли по методике И.А. Мухомцева [10] с использованием собственных наработок [4, 5].

Депонирование углерода (ДУ) определяли по [4], биологическую продуктивность (БП, относительное увеличение первоначальной сухой фитомассы растения) – по [6]. Листовой (ЛИ) и корневой индексы (КИ) находили как част-

ное от деления площади листьев и активной поверхности корневой системы целого растения на площадь его питания. Чистую первичную продукцию (ЧПП) устанавливали как произведение чистой продуктивности фотосинтеза (ЧПФ, г/м²·день), числа безморозных дней в году и ЛИ (г/м² площади питания в год). Чистую минеральную продуктивность по азоту (ЧМП(Н)) вычисляли как произведение МП элемента (мг/м²·сут.), продолжительности безморозного периода и КИ (г/м² площади питания в год).

Характеристика объекта исследования – семенных древостоев дуба черешчатого *Quercus robur* L. – представлена в табл. 1.

Таблица 1

Условия произрастания семенных древостоев дуба
The growing conditions of oak seed stands

Регион	Условия произрастания	Возраст, лет	Количество растений, экз./га	Безморозный период, дни	Тип почвы	Климат
Германия	Широколиственные леса	20–160	72–4820	150	Бурая лесная	Переходный от морского к континентальному
Литва	Смешенные леса	10–150	101–12 158	140	Дерново-подзолистая	Умеренно континентальный
Белоруссия		20–180	480–4900	140		
Украина	Лесостепь	20–160	137–3070	140	Серая лесная	Умеренный переходный к континентальному
Центральная Россия	Хвойно-широколиственные леса	20–200	142–4522	130	Дерново-подзолистая	Континентальный
Чувашия	Смешенные леса	10–160	124–16 124	130	Серая лесная	Умеренно континентальный
Башкирия	Леса предгорий Южного Урала	10–150	282–8913	120	Дерново-подзолистая	Континентальный
Северный Кавказ	Широколиственные леса	20–140	202–5169	140	Черноземная	Умеренно континентальный

Примечание: Класс бонитета – I.

Полученные результаты обрабатывали корреляционным и регрессионным методами анализа.

Результаты исследования и их обсуждение

Установлено, что у растений дуба 10–20...140–200 лет связи ЧПФ, БП и ЧПП с возрастом во всех регионах отрицательны ($r = -0,875...-0,943$; $-0,645...-0,873$; $-0,907...-0,983$ соответственно) и снизились в 2,8–12,9; 2,6–6,4 и 2,5–10,8 раза соответственно. Во всех регионах связь МП с возрастом растений была отрицательной ($r = -0,847...-0,965$; $-0,808...-0,935$; $-0,817...-0,926$), а поглощение азота снизилось в 4,8–18,6 раза, фосфора – в 5,3–21,1 раза, а калия – в 4,9–16,0 раз (рис. 1). Характер взаимосвязи физиологических процессов в онтогенезе приведен в одном масштабе, % от максимума (рис. 2).

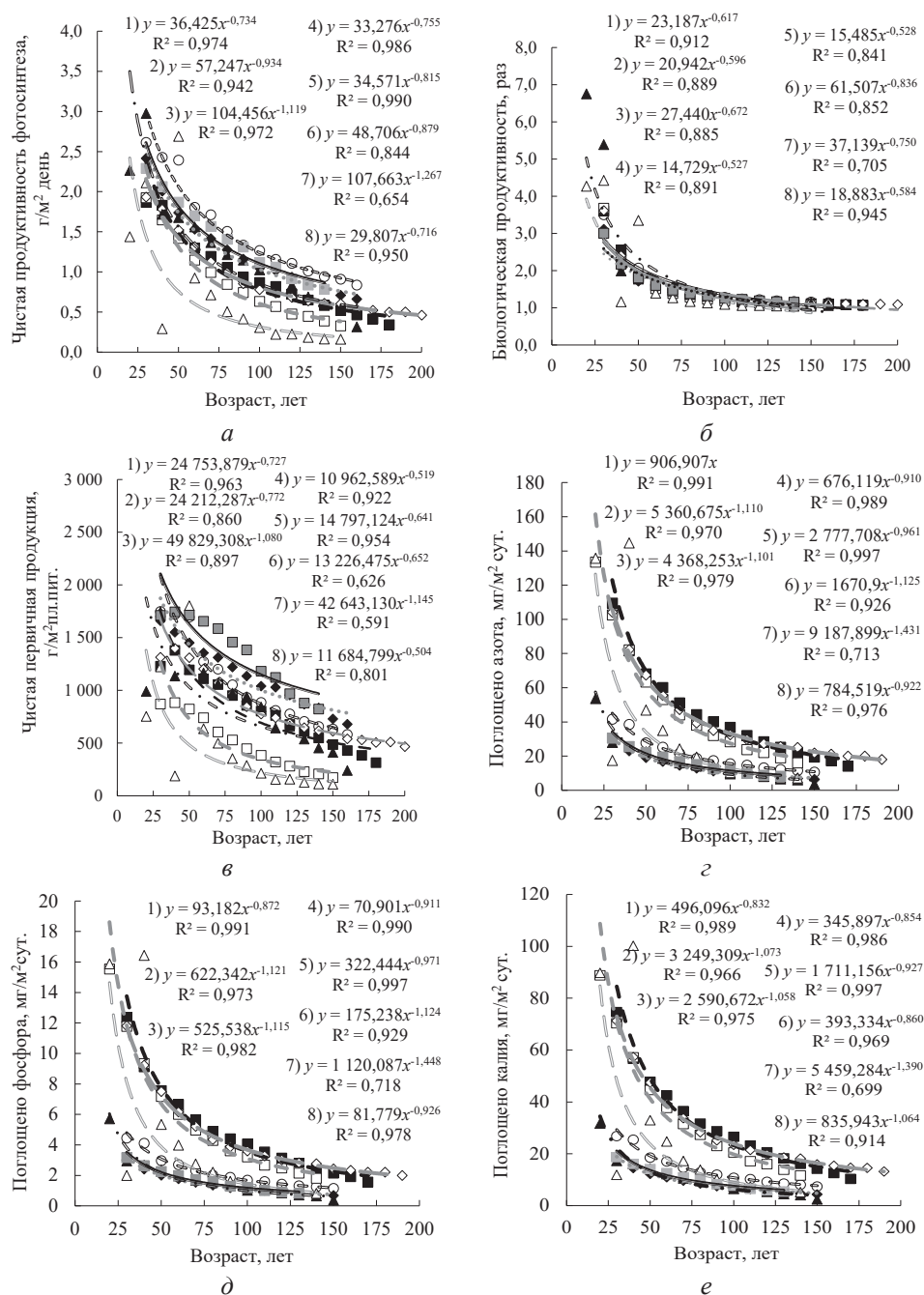


Рис. 1. Чистая продуктивность фотосинтеза (а), биологическая продуктивность (б), чистая первичная продукция (в) и поглощение N (г), P (д), K (е) растениями дуба черешчатого в онтогенезе на территории от Германии до юго-востока Русской равнины

Fig. 1. The net photosynthetic productivity (а), biological productivity (б), net primary production (в) and absorption of N (г), P (д) and K (е) by the English oak trees during the ontogeny in the territory from Germany to the south-east of the Russian Plain

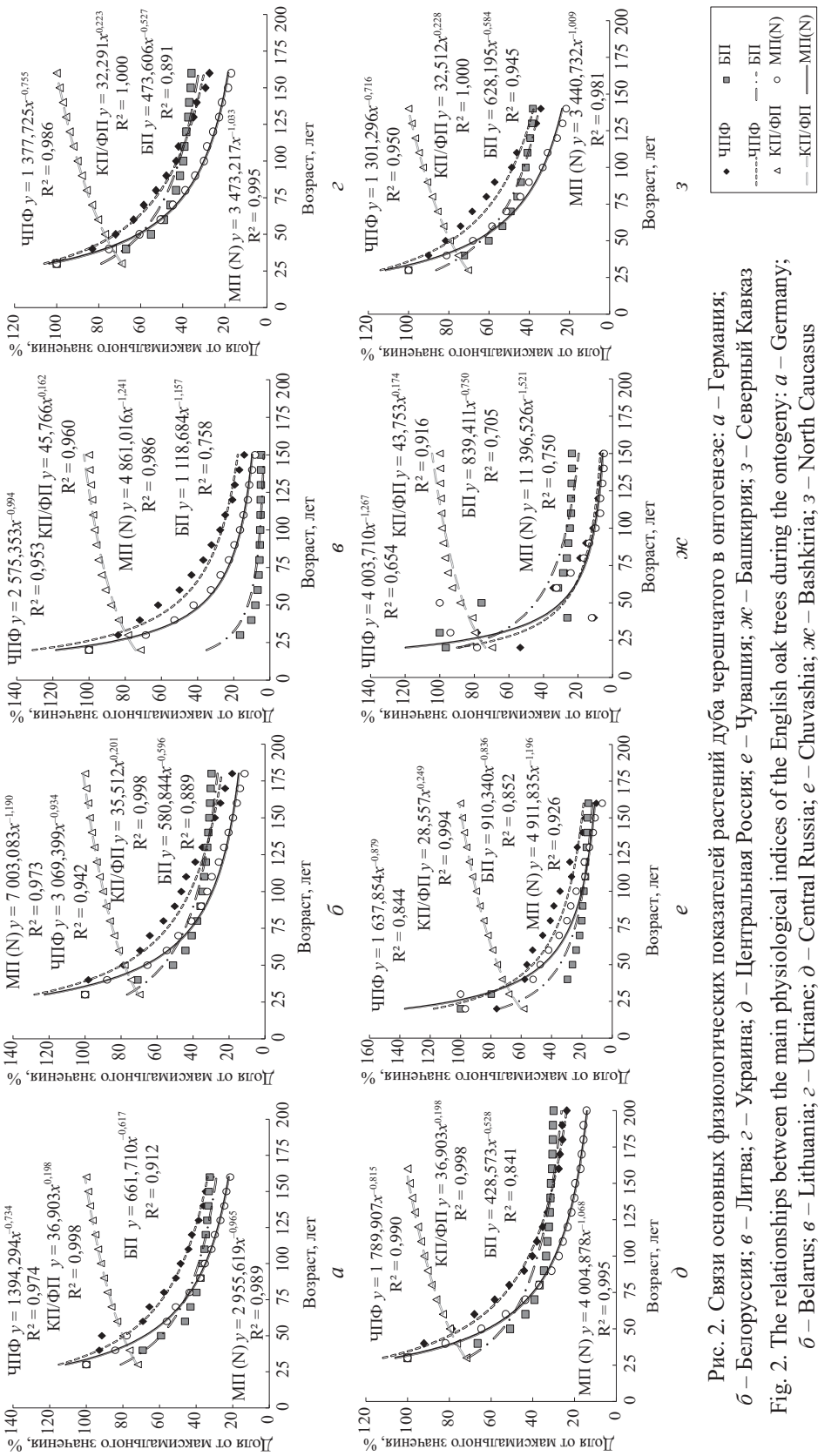


Рис. 2. Связи основных физиологических показателей растений дуба черешчатого в онтогенезе: а – Германия; б – Белоруссия; в – Литва; г – Украина; д – Центральная Россия; е – Чувашия; ж – Башкирия; з – Северный Кавказ; и – Крым. The relationships between the main physiological indices of the English oak trees during the ontogeny: a – Germany; б – Belarus; в – Lithuania; г – Ukraine; д – Central Russia; е – Chuvashia; ж – Bashkiriа; з – North Caucasus; и – Crimea.

Связь МП с ЧПФ и БП во всех регионах была высокой положительной ($r = 0,863...0,998$; $0,797...0,991$ соответственно). С возрастом растений БП уменьшалась не так резко, как ЧПФ и МП, что объясняется активизацией адаптивной реакции растения на снижение поглотительной деятельности корней, выразившейся в увеличении соотношения КП/ФП во всех регионах в 1,2–1,7 раза. Связь величины соотношения КП/ФП и возраста растений была высокой положительной ($r = 0,863...0,980$). ЛИ и КИ в пределах регионов в онтогенезе изменялись от 1,2 до 3,6 и от 1,8 до 6,3 раза соответственно. Связь соотношения КП/ФП с МП, ЧПФ и БП оказалась отрицательной ($r = -0,947...-0,991$; $-0,783...-0,988$; $-0,838...-0,924$ соответственно). Сравнительные количественные показатели физиологических процессов у растений дуба в возрасте от 30 до 120 лет представлены в табл. 2.

В 30-летнем возрасте ЧПФ по всем регионам находилась на уровне от 1,56 до 3,20 г/м²·день. Разница по этому показателю составила 2,1 раза. Корневые системы в регионах поглощали азота от 34 до 149 мг/м²·сут., различаясь между собой в 4,4 раза. ЧПП составила от 864 до 1799 г/м² с разницей между регионами в 2,1 раза. ЧМП(N) за вегетацию была от 3,0 до 6,79 г/м², отличаясь в 2,3 раза. Между ЧПП и ЧМП(N) по всем регионам установлена высокая положительная связь ($r = 0,927$). При формировании ЧПП растения дуба депонировали углерода от 432 до 900 г/м² площади питания. Высокие показатели отмечены в условиях Германии, Украины, Чувашии и Северного Кавказа, а низкие – Литвы и Белоруссии.

Для 60-летнего возраста древостоя по всем регионам зафиксировано снижение поглотительной деятельности корней. Более высокие значения сохранились в условиях Литвы, Центральной России и Башкирии – на уровне 61, 72 и 95 мг/м²·сут. соответственно. В других регионах этот показатель был от 18 до 34 мг/м²·сут. ЧПФ по регионам находилась на уровне от 0,96 до 2,51 г/м²·день. Значительное снижение фотосинтеза наблюдалось в условиях Литвы и Белоруссии. Разница между регионами составила 2,6 раза. Повышенная фотосинтетическая активность способствовала формированию в условиях Северного Кавказа высокой ЧПП (1792 г/м²).

Самая низкая ЧПП установлена в условиях Литвы и Белоруссии. В других регионах она находилась на уровне от 1135 до 1349 г/м², а разница между регионами составила 4 раза. Древостои дуба Северного Кавказа также поглощали наибольшее количество азота (5,58 г/м²). Минимальные значения были зафиксированы для Литвы и Белоруссии. В других регионах этот процесс характеризовался показателями от 3,53 до 4,56 г/м², различаясь между регионами в 4,2 раза. Между ЧПП и ЧМП(N) установлена высокая положительная связь ($r = 0,996$). При формировании ЧПП депонирование углерода протекало на уровне от 303 до 896 г/м², различаясь по регионам в 3,0 раза.

В 90-летнем возрасте древостоев поглощение азота во всех регионах было от 13 до 42 мг/м²·сут. Фотосинтетическая активность лежала в пределах 0,48...1,88 г/м²·день. Резкое снижение этого показателя наблюдалось у растений Башкирии (0,48 г/м²·день). В остальных регионах ЧПФ колебалась от 0,74 до 1,31 г/м²·день, а разница достигла 3,9 раза. Резкое падение ЧПП установлено для условий Башкирии и Литвы. Самые высокие показатели сохранились в условиях Германии (1325 г/м²) и Северного Кавказа (1357 г/м²). В других регионах значение находилось на уровне от 704 до 943 г/м².

Таблица 2

Количественные показатели чистой продуктивности фотосинтеза, поглощения азота, чистой первичной продукции, депонирования углерода, чистой минеральной продуктивности по азоту и эффективности формирования биомассы на единицу массы поглощенного азота у дуба черешчатого в возрасте 30–120 лет

The quantitative indices of net photosynthetic productivity, nitrogen absorption, net primary production, carbon sequestration, net mineral productivity for nitrogen and the efficiency of biomass formation per unit mass of absorbed nitrogen in the English oak trees aged 30–120 years

Регион	ЧПФ, г/м ² -день	МП (N), мг/м ² -сут.	ЧПП	Депонирова- но углерода		ЧМП (N)	ЧПП/ЧМП (N), г/г	ЧПФ, г/м ² -день	МП (N), мг/м ² -сут.	ЧПП	Депонирова- но углерода		ЧМП (N)	ЧПП/ЧМП (N), г/г
				г/м ² -площади питания в год	г/м ² -площади питания в год									
											г/м ² -площади питания в год	г/м ² -площади питания в год		
30 лет														
Германия	2,12	49	1799	900	5,66	318	1,80	28	1269	635	3,95	321		
Литва	1,93	135	864	432	3,02	286	1,14	61	606	303	1,79	339		
Белоруссия	1,56	34	874	437	3,00	291	0,96	18	806	403	2,52	320		
Украина	2,42	37	1694	847	5,44	311	1,53	21	1349	675	4,56	296		
Центральная Россия	2,08	132	1297	649	4,29	302	1,42	72	1200	600	3,65	329		
Чувашия	3,20	57	1747	874	5,71	306	1,68	24	1158	579	3,53	328		
Башкирия	2,46	149	1210	605	4,11	294	1,97	95	1135	568	3,53	322		
Северный Кавказ	2,30	48	1642	829	6,79	242	2,51	34	1792	896	5,58	325		
90 лет														
Германия	1,88	26	1325	663	3,90	340	1,11	15	783	392	2,39	328		
Литва	0,74	42	383	192	1,29	297	0,48	23	228	114	0,64	356		
Белоруссия	0,72	13	704	352	2,11	334	0,43	8	482	241	1,44	335		
Украина	0,93	13	924	462	3,40	272	0,93	10	950	475	2,91	326		
Центральная Россия	0,92	42	849	425	2,51	338	0,73	32	683	342	2,04	335		
Чувашия	1,23	16	943	472	2,85	331	0,90	11	667	334	2,16	309		
Башкирия	0,48	22	288	144	0,87	331	0,26	12	156	78	0,48	325		
Северный Кавказ	1,31	16	1357	679	4,14	328	0,91	10	968	484	2,81	344		

ЧМП(N) была от 0,87 до 4,14 г/м² площади питания. Снижение поглотительной деятельности корней отмечено для условий Башкирии, Литвы и Белоруссии. Повышенная ЧМП(N) сохранилась в древостоях Северного Кавказа (4,14 г/м²) и Германии (3,90 г/м²). В других регионах поглощение азота отмечено на уровне от 2,51 до 3,40 г/м². Между значениями ЧПП и ЧМП(N) установлена высокая положительная связь ($r = 0,982$). Депонирование углерода составило от 144 до 679 г/м² площади питания, различаясь по регионам в 4,7 раза.

В 120-летнем возрасте растения дуба поглощали азота от 8 до 32 мг/м²·сут., а разница между регионами составила 4 раза. Фотосинтетическая активность листового аппарата была на уровне от 0,26 до 1,11 г/м²·день. Самые низкие значения оказались характерны для условий Башкирии, Литвы и Белоруссии. Более высокие показатели фотосинтеза сохранились в древостоях Германии, Украины и Северного Кавказа. В регионах фотосинтетическая активность растений различалась в 4,3 раза. ЧПП во всех регионах была на уровне от 156 до 968 г/м². Как низкое накопление биомассы описывается для Башкирии, Литвы и Белоруссии. Повышенная ЧПП сформировалась в древостоях Северного Кавказа, Украины и Германии. В условиях Центральной России и Чувашии эти показатели зафиксированы соответственно на уровне 683 и 667 г/м². Различия в количестве сформированной ЧПП на 1 м² площади питания растений составили 6,2 раза. Поглощение корнями дуба азота было от 0,48 до 2,91 г/м². Минимальные значения установлены для Башкирии, Литвы и Белоруссии. Различия между регионами достигли 6,1 раза. Для ЧПП и ЧМП(N) всех регионов установлена высокая положительная связь ($r = 0,997$). При формировании ЧПП растения дуба депонировали углерода от 114 до 484 г/м² площади питания.

Приведенные в табл. 2 количественные показатели ЧПП и ЧМП(N) позволяют определить эффективность формирования биомассы растениями дуба в расчете на 1 г поглощенного азота в возрастные периоды древостоя от 30 до 120 лет. Несмотря на то, что насаждения представлены генетически неоднородными сеянцами и произрастают в контрастных экологических условиях, количество сформированной биомассы, приходящейся на единицу поглощенного азота, характеризуется значительным постоянством: коэффициент варьирования был на уровне 8,0; 3,8; 7,5 и 4,3 % соответственно в 30, 60, 90 и 120 лет, а в среднем по регионам на 1 г азота сформировано 293, 322, 321 и 332 г биомассы соответственно. Коэффициент корреляции между поглощением азота корнями дуба в онтогенезе и эффективностью его использования при формировании биомассы (г/м² площади питания) был отрицательным ($r = -0,926$).

Заключение

Получены количественные показатели функционирования корневой системы, листового аппарата, чистой первичной продукции и депонирования углерода у растений дуба на уровне организма в возрасте древостоя от 10–20 до 140–200 лет на пространстве от Германии до юго-восточных пределов Русской равнины. Во всех регионах связь минеральной продуктивности с возрастом растений оказалась отрицательной, а биологическая продуктивность уменьшалась не так резко, как чистая продуктивность фотосинтеза и минеральная продуктивность, что объясняется активизацией адаптивной реакции растений на снижение поглотительной деятельности корней.

С возрастом растения все физиологические показатели уменьшались, а количественные значения для разных регионов различались по чистой продуктивности фотосинтеза в 2,1–4,3, а чистая первичная продукция и депонирование углерода – в 2,1–6,2 раза. Между чистой первичной продукцией и чистой минеральной продуктивностью по азоту по всем возрастам растений установлена высокая положительная связь ($r = 0,927 \dots 0,997$).

Использование эколого-физиологического анализа табличных данных продуктивности деревьев дуба позволяет установить характер взаимосвязи физиологических процессов в период формирования биомассы на уровне организма, что может служить теоретической основой при разработке технологических приемов повышения биологической продуктивности растений и определении количественных показателей чистой минеральной продуктивности по азоту, чистой продуктивности фотосинтеза, чистой первичной продукции и депонирования углерода с адаптацией к конкретным лесорастительным условиям. Принятие во внимание в модельных и прогностических расчетах адаптированных количественных физиологических процессов растения существенно повысит точность оценок биологических и карбоновых показателей лесных фитоценозов, имеющих важное экологическое и государственное значение.

Лучшими для произрастания семенных растений дуба являются условия Германии, Украины, Северного Кавказа, Чувашии и Центральной России, менее благоприятные – в Литве, Белоруссии и Башкирии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бессчетнов В.П., Лебедев Е.В. Фотосинтез и биологическая продуктивность лесообразующих пород Волго-Вятского региона // Актуал. проблемы лесн. хоз-ва и рациональное использование ресурсов Нижегородск. области. Н. Новгород: НГСХА, 2002. С. 107–116.

Besschetnov V.P., Lebedev E.V. Photosynthesis and Biological Productivity of Forest-Forming Species of the Volga-Vyatka Region. *Current Issues of Forestry and Rational Use of Resources in the Nizhny Novgorod Region*. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, 2002, pp. 107–116. (In Russ.).

2. Курнаев С.Ф. Лесорастительное районирование СССР. М.: АН СССР, 1973. 203 с. Kurnaev S.F. *Forest Vegetation Zoning of the USSR*. Moscow, USSR Academy of Sciences Publ., 1973. 203 p. (In Russ.).

3. Лазарева М.С., Ефименко В.И., Климович Л.К. Модели роста мягко-лиственно-дубовых насаждений Беларуси // Сб. науч. тр. / Нац. Акад. наук Беларуси. Ин-т леса. Гомель, 2010. Вып. 70. С. 66–75.

Lazareva M.S., Efimenko V.I., Klimovich L.K. Growth Patterns of Softwood-Oak Plantations in Belarus. *Collection of Scientific Proceedings*. Gomel, National Academy of Sciences of Belarus, Forest Institute, 2010, iss. 70, pp. 66–75. (In Russ.).

4. Лебедев В.М., Лебедев Е.В. Функционирование листового аппарата, корневой системы и биологическая продуктивность лиственницы сибирской на уровне организма в онтогенезе (на примере лиственничников Архангельской области) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 3. С. 9–19.

Lebedev V.M., Lebedev E.V. Functioning of the Leaf Apparatus, Root System and Biological Productivity of Siberian Larch on the Level of the Organism in Ontogeny (the Case of Larch Forests of the Arkhangelsk Region). *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2018, no. 3, pp. 9–19. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.3.9>

5. Лебедев Е.В. Биологическая продуктивность и минеральное питание ели европейской в онтогенезе в условиях северной Европы // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2012. № 198. С. 4–13.

Lebedev E.V. Biological Productivity and Mineral Nutrition of Norway Spruce in Ontogenesis in the Conditions of Northern Europe. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhniceskoj akademii*, 2012, no. 198, pp. 4–13. (In Russ.).

6. Лебедев Е.В. Биологическая продуктивность дуба черешчатого на уровне организма в онтогенезе в европейской части России // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2013. № 3. С. 28–32.

Lebedev E.V. Biological Productivity of English Oak at the Organism Level in the Ontogeny in European Russia. *Lesnoj vestnik* = Forestry Bulletin, 2013, no. 3, pp. 28–32. (In Russ.).

7. Меницкий Ю.Л. Порядок (Fagales) семейство буковые // Жизнь растений в 6 т. М.: Просвещение, 1980. Т. 5. С. 293–311.

Menitskij Yu.L. Order (Fagales) Beech Family. *Life of Plants in 6 Vols.* Moscow, Prosveshchenie Publ., 1980, vol. 5, pp. 293–311. (In Russ.).

8. Молчанов А.Г. Функциональная характеристика фотосинтетического аппарата сосны, березы, дуба // Структура и функции лесов Европейской России / Институт лесоведения РАН. М., 2009. С. 80–105.

Molchanov A.G. Functional Characteristics of the Photosynthetic Apparatus of Pine, Birch, Oak. *Structure and Functions of Forests in European Russia*. Moscow, Institute of Forest Science of the Russian Academy of Sciences, 2009, pp. 80–105. (In Russ.).

9. Молчанов А.Г., Молчанова Т.Г., Мамаев В.В. Физиологические процессы у семян дуба черешчатого при недостатке влаги // Лесоведение. 1996. № 1. С. 54–64.

Molchanov A.G., Molchanova T.G., Mamaev V.V. Physiological Processes in English Oak Seedlings under Moisture Deficiency. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 1996, no. 1, pp. 54–64. (In Russ.).

10. Муромцев И.А. Активная часть корневой системы плодовых растений. М: Колос, 1969. 247 с.

Muromtsev I.A. *The Active Part of the Root System of Fruit Plants*. Moscow, Kolos Publ., 1969. 247 p. (In Russ.).

11. Ничипорович А.А. О методах учета и изучения фотосинтеза как фактора урожайности // Тр. ИФР АН СССР. 1955. Т. 10. С. 210–249.

Nichiporovich A.A. On Methods of Accounting and Studying Photosynthesis as a Factor in Crop Yield. *Proceedings of the K.A. Timiryazev Institute of Plant Physiology Russian Academy of Sciences*, 1955, vol. 10, pp. 210–249. (In Russ.).

12. Усольцев В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: нормативы и элементы географии. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 763 с.

Usoltsev V.A. *Forest Phytomass in Northern Eurasia: Standards and Geographic Elements*. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2002. 763 p. (In Russ.).

13. Усольцев В.А. Фитомасса и первичная продукция лесов Евразии. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 569 с.

Usoltsev V.A. *Phytomass and Primary Production of Eurasian Forests*. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2010. 569 p. (In Russ.).

14. Усольцев В.А., Колчин К.В., Часовских В.П. Чистая первичная продукция лесобразующих пород в климатических градиентах Евразии // Сиб. лесн. журн. 2018. № 2. С. 28–37.

Usoltsev V.A., Kolchin K.V., Chasovskikh V.P. Net Primary Production of Forest-Forming Species in Climatic Gradients of Eurasia. *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2018, no. 2, pp. 28–37. (In Russ.).

15. Цельникер Ю.Л., Корзухин М.Д., Семенов С.М. Модельный анализ широтного распределения продуктивности лесных пород России // Лесоведение. 2010. № 2. С. 36–45.

Tsel'niker Yu.L., Korzukhin M.D., Semenov S.M. Model Analysis of Latitudinal Distribution of Forest Species in Russia. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2010, no. 2, pp. 36–45. (In Russ.).

16. Dryer E. Compared Sensitivity of Seedlings from 3 Woody Species (*Quercus robur* L., *Quercus rubra* L. and *Fagus sylvatica* L.) to Water-Logging and Associated Root Hypoxia: Effects on Water Relations and Photosynthesis. *Annals of Forest Science*, 1994, vol. 51, no. 4, pp. 417–428. <https://doi.org/10.1051/forest:19940407>

17. Isaev A., Korovin G., Zamolodchikov D., Utkin A., Pryaznikov A. Carbon Stock and Deposition in Phytomass of the Russian Forests. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1995, vol. 82, pp. 247–256. <https://doi.org/10.1007/BF01182838>

18. Jiang L., Zhao W., Lewis B.J., Wei Y., Dai L. Effects of Management Regimes on Carbon Sequestration under the Natural Forest Protection Program in Northeast China. *Journal of Forestry Research*, 2018, vol. 29, pp. 1187–1194. <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0542-0>

19. Jiao Y.Y., Ren H.E., Dong B. Optimal Estimation of Forest Carbon Sequestration Based on Eddy Correlation Method. *Advances in Computer Science, Intelligent System and Environment. Advances in Intelligent and Soft Computing*, 2011, vol. 105, pp. 421–426. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23756-0_68

20. Lundmark T., Bergh J., Strand M., Koppel A. Seasonal Variation of Maximum Photochemical Efficiency in Boreal Norway Spruce Stands. *Trees*, 1998, vol. 13, pp. 63–67. <https://doi.org/10.1007/s004680050187>

21. O'Connell K.E.B., Gower S.T., Norman J.M. Comparison of Net Primary Production and Light-Use Dynamics of Two Boreal Black Spruce Forest Communities. *Ecosystems*, 2003, vol. 6, pp. 236–247. <https://doi.org/10.1007/PL00021510>

22. Suvorova G.G., Oskorbina M.V., Kopytova L.D., Yankova L.S., Popova E.V. Seasonal Changes in Photosynthetic Activity and Chlorophylls in the Scots Pine and Siberian Spruce with Optimal or Insufficient Moistening. *Contemporary Problems of Ecology*, 2011, vol. 4, pp. 626–633. <https://doi.org/10.1134/S1995425511060105>

23. Xue L., Luo X., Wu X. Analysis of the Efficiency of Forestry Production and Convergence in China's Four Major Forest Areas Based on the Perspective of Carbon Sequestration Benefits. *Global Ecological Governance and Ecological Economy. Research Series on the Chinese Dream and China's Development Path*. Singapore, Springer, 2022, pp. 195–212. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7025-1_13

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest