

УДК 630*232.32:504.062.4

ДЕПОНИРОВАНИЕ УГЛЕРОДА И ПРОДУЦИРОВАНИЕ КИСЛОРОДА В КУЛЬТУРАХ ДУБА МАЙКОПСКОГО ЛЕСНИЧЕСТВА РЕСПУБЛИКИ АДЫГЕИ

© 2024 г. Е. Н. Штепа^{1,*}, С. С. Шешнищан¹, В. Ю. Кулаков²¹ Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова,
ул. Тимирязева, д. 8, Воронеж, 394087, Россия² Академический центр лесного проектирования и инноваций, Московский пр-т, д. 19, г. Воронеж, 394026, Россия

* E-mail: kulakova_92@list.ru

Поступила в редакцию 26.12.2022

После доработки 08.02.2024

Принята к публикации 12.04.2024

Леса в горных и предгорных районах обеспечивают множество важнейших экосистемных услуг, но изменения в землепользовании, такие как вырубка лесов или, напротив, облесение и лесовосстановление, могут существенным образом влиять на их потенциал. Искусственные лесные насаждения способны выполнять аналогичные функции, но эффективность их зависит от видового состава, возраста и методов управления. Восстановление лесов в этих районах имеет решающее значение для смягчения последствий изменения климата и адаптации к ним, увеличения биоразнообразия и сохранения водных ресурсов. Искусственные лесные насаждения на Северном Кавказе создавались с целью повышения продуктивности дубовых лесов, и благодаря этим мероприятиям в Республике Адыгее лесистость оказалась значительно выше, чем в соседних регионах. Целью исследования была оценка углерододепонирующей и кислородопродуцирующей роли искусственных лесных насаждений с участием дуба в предгорьях Северного Кавказа в условиях Республики Адыгеи. Установлено, что в чистых 70-летних дубовых насаждениях максимальный прирост по запасу составил 5.81 м³/га в год, а в смешанных 58-летних отмечалось минимальное значение — 1.04 м³/га в год. Интенсивность накопления углерода и продукции кислорода рассчитывалась через прирост фитомассы. Результаты показали, что по мере увеличения доли участия дуба в составе древостоя продукционные показатели и секвестрационный потенциал значительно возрастали. Искусственные насаждения Майкопского лесничества накопили в своей надземной и подземной фитомассе от 31 до 328 тС/га. Годичная аккумуляция СО₂ лесами изменялась от 1.98 до 17.17 т/га в год, а годичная продукция О₂ составляла 1.71–12.79 т/га в год. Доказано, что в целях увеличения секвестрационного потенциала в условиях предгорий Северного Кавказа одним из наиболее результативных подходов может стать целенаправленное выращивание чистых и смешанных лесов с преобладанием семенного дуба, а не создание разнообразных многовидовых насаждений, включающих граб и бук.

Ключевые слова: дубравы, предгорья Северного Кавказа, фитомасса, текущий прирост, годовое поглощение углекислого газа, продукция кислорода, экосистемные услуги, митигация

DOI: 10.31857/S0024114824030049, EDN: PEGUMS

Леса предгорий и горных регионов характеризуются многофункциональностью, предоставляя разнообразные экологические, социальные и экономические услуги (Tognetti et al., 2021), являясь важным инструментом регулирования климата и поддержания углеродного цикла (Chameides, Perdue, 1997). С другой стороны, многофункциональный характер усиливает динамику и уязвимость лесов по отношению к антропогенным и климатическим изменениям. Изменения в землепользовании (в частности, обезлесение) влияют на качество экосистемных услуг, предоставляемых лесными экосистемами горных и предгорных регионов, что

приводит к увеличению риска наводнений, засух, ураганов, эрозии почвы и снижению продовольственной безопасности (Noulèkoun et al., 2021). Создаваемые искусственные леса могут предоставлять многие экосистемные услуги, аналогичные услугам естественных лесов, однако эффективность предоставления этих услуг может варьировать в зависимости от таких факторов, как породный состав деревьев, возраст древостоя и методы управления (Guo et al., 2023).

Усилия по лесовосстановлению в горных и предгорных районах привлекают все большее внимание благодаря своему потенциалу как для смягчения последствий изменения климата, так и для адаптации

к ним (Tognetti et al., 2021). Восстановление дубовых лесов способно повысить местное биоразнообразие и обеспечить среду обитания для многочисленных видов (Von Holle et al., 2020). Кроме того, мероприятия по восстановлению лесов могут способствовать адаптации к изменению климата, защищая почву от эрозии, сохраняя водные ресурсы, что открывает большие перспективы в решении экологических и климатических проблем на региональном уровне.

Использование недорогостоящей естественной регенерации лесной растительности на вырубках в условиях пересеченной местности необязательно является многообещающим методом устойчивого ведения лесного хозяйства. Некоторые «аборигенные» виды деревьев могут иметь сниженную продуктивность в результате изменения климата, поскольку условия на участке уже изменились за время существования лесов (Tognetti et al., 2021). Искусственные лесные насаждения создавались на Северном Кавказе с целью повышения продуктивности дубрав, в том числе путем интродукции новых видов древесных пород (Кулакова, Чернудов, 2016; Кулакова и др., 2017), и обеспечения потенциала экосистемных услуг. Поэтому важно оценить эффективность искусственных лесных насаждений в поглощении углерода и продуцировании кислорода, чтобы лучше понять их потенциальный вклад в смягчение последствий изменения климата и поддержание экологического баланса в горных и предгорных районах (Nave et al., 2019).

С точки зрения древесной и биологической продуктивности Республика Адыгея значительно превосходит леса других регионов во многом из-за различий в площади, покрытой лесом. Лесистость Республики Адыгеи составляет 37,3 % благодаря лесокультурным мероприятиям, реализованным в прошлом. По данным Национального доклада (Национальный доклад... 2023), в последние годы запасы углерода в лесах республики достигали около 39 млн тонн, а поглощение углерода варьировало в пределах 136—152 тыс. тонн в год, что сопоставимо с аналогичными показателями для республик Северного Кавказа или даже превышает их.

Цель исследования состояла в оценке углерододепонирующей и кислородопродуцирующей роли искусственных лесных насаждений с участием дуба в предгорьях Северного Кавказа (на примере лесов Республики Адыгеи).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследования проводились на территории Майкопского лесничества Республики Адыгеи (Южный федеральный округ). Майкопское лесничество расположено в центральной и южной части республики на территории двух участков лесничеств: Лесо-семенного и Курджипского. Для исследования выбраны участки с оптимальными для произрастания

дуба лесорастительными условиями дубравы свежей (D_2). Почвенный покров представлен серыми лесными, бурыми лесными оподзоленными почвами, местами встречаются дерново-карбонатные почвы на известняках и доломитах.

В основу исследований положен метод пробных площадей. Пробные площади заложены с учетом требований ОСТ 56-69-83. Всего заложено 11 постоянных пробных площадей (ППП) по 0,25 га каждая. Перед закладкой пробных площадей проводилось рекогносцировочное обследование насаждений с определением их общего состояния (Калиниченко, 2000). На PPP определяли основные таксационные показатели древостоя: возраст, высоту, диаметр ствола, полноту и запас. Проведен сплошной пересчет деревьев с распределением по породам, ступеням толщины и категориям состояния. Размер ступени толщины принят в зависимости от среднего диаметра древостоя: так при диаметре от 6,1 до 16 см ступень принималась равной 2 см, при среднем диаметре 16,1 и более — 4 см. Для измерения диаметра ствола на высоте 1,3 м использовалась мерная вилка, для определения высоты — высотомер SUUNTO PM-5/1520 РС, для определения возраста — возрастной бурав. Таксационная характеристика насаждений с участием дуба, определенная на PPP, представлена в табл. 1.

После проведения полевых исследований в камеральных условиях, основываясь на методике В. И. Таранкова (Таранков, 2006), оценили углерододепонирующую и кислородопродуцирующую функции древесных ценозов. Для оценки запасов углерода использовали расчетно-измерительный метод. При оценке поглощения углекислого газа и выделения кислорода применялся расчетный метод. По текущему приросту фитомассы рассчитывалась интенсивность депонирования углерода. При расчете количества выделяемого кислорода учитывался только прирост древесины, а биомасса листьев не принималась во внимание, поскольку часть выделившегося O_2 расходуется в процессе ее разложения в опаде.

При образовании 1 тонны сухой древесины поглощается 1,8 тонны углекислого газа и выделяется 1,4 тонны кислорода. Известно, что от массы стволовой древесины 15 % составляют ветви и сучья, 20 % — корни, 3 % — листва. По процентным составляющим находили массу ветвей и сучьев, корней и листвы.

Зная плотность древесины и ее запас, путем их умножения находили массу древесины (Таранков, 2000). По данным химического состава, 1 тонна сухой древесины содержит 500 кг углерода. Общую фитомассу определяли как сумму всех составляющих древостоя.

Таким образом, через уравнение фотосинтеза при умножении массы годичного прироста в абсолютно сухом состоянии на коэффициент продуцирования кислорода (1,4) и величину поглощения CO_2 (1,8) определяли массу выделенного за год кислорода, который можно перевести в объем через объемный вес O_2 , равный 1,43 г/л поглощенного углекислого газа.

Таблица 1. Таксационная характеристика искусственных насаждений дуба в Майкопском лесничестве

№ ППП	№ квартала/ выдела	Состав насаждения	А, лет	Н, м	ДВН, см	Бонитет	Полнота	Запас, м ³ /га	Средний прирост, м ³ /год
Майкопское лесничество, Лесосеменное участковое лесничество									
1	28/19	10ДГ+Г+КЛП	68	20	28	II	0.7	349.0	5.13
2	28/18	10ДЧ+Г	68	19	20	II	0.7	395.0	5.81
3	28/1	5ДЧ3Г2КЛП	70	20	22	II	0.7	378.6	5.41
Майкопское лесничество, Курджипское участковое лесничество									
4	5/14	5ДК2ДЧ1Г2ОС	50	17	20	II	0.8	144.0	2.88
5	40/9.53	5ДЧ5Г+БК	58	17	24	II	0.8	112.4	1.94
6	40/18	4ДЧ5Г1БК	58	18	24	II	0.7	78.54	1.35
7	40/20	6ДЧ4Г+БК	57	18	24	II	0.7	142.9	2.51
8	40/26	3ДЧ5Г2БК	58	18	26	II	0.8	125.7	2.16
9	40/28	3ДЧ5Г2БК+ОС	58	18	26	II	0.7	84.42	1.45
10	40/38	4ДЧ3Г2БК1ОЛЧ+ОС	58	18	26	II	0.5	60.61	1.04
11	40/41	4ДЧ3Г2БК1ОЛЧ+ОС	58	18	26	II	0.7	68.06	1.17

Примечание. ППП — постоянная пробная площадь, А — возраст древостоя, Н — высота, ДВН — диаметр ствола на высоте 1.3 м; виды деревьев: ДГ — дуб Гартвиса, ДК — дуб красный, ДЧ — дуб черешчатый, Г — граб кавказский, БК — бук восточный, ОЛЧ — ольха черная, ОС — осина. КЛП — клен полевой.

Главный принцип расчета массы углерода в древостоях основан на дифференциации их фитомассы по отдельным элементам. На основе запаса древостоя вычисляются запасы других компонентов: коры, сучьев, ветвей, древесной зелени, пней, корней.

Чтобы установить содержание углерода в разных компонентах древостоя, определяется запас фитомассы каждого из них. Далее с помощью коэффициентов содержания углерода в абсолютно сухом веществе фитомассы рассчитывается его масса в каждом компоненте древостоя. Затем полученные данные суммируются.

Из вышесказанного видим, что запас определяется через общий запас фитомассы древесной, кустарниковой растительности на территории лесного фонда и удельное содержание углерода в фитомассе. Исходными данными для количественной оценки кислородопroduцирующей и углероддепонирующей функций, аккумулированных в первичной продукции лесных экосистем, являются элементы биологической продуктивности, выраженные в весовых единицах абсолютно сухого вещества (Уткин и др., 2006).

Статистическую обработку данных и корреляционно-регрессионный анализ проводили в пакете прикладных программ STATISTICA 12. В исследовании принят уровень значимости $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Скорость роста искусственных насаждений отражается в величине их среднего прироста по запасу. Максимальное значение прироста установлено в чистых древостоях дуба черешчатого (*Quercus*

robur L.) Лесосеменного участкового лесничества в возрасте 70 лет, и оно составляет 5.81 м³/га в год, а минимальное значение отмечено в смешанных насаждениях дуба черешчатого Курджипского участкового лесничества, где к возрасту 58 лет текущий прирост по запасу составляет 1.04 м³/га в год. Заметим, что при одинаковой полноте древостоев (0.7—0.8) наблюдается заметная вариабельность (в пределах одного порядка) как запаса сырой древесины, так и текущего прироста древесины от 1.17 до 5.81 м³/га в год, что наиболее вероятно отражает влияние лимитирующего фактора плодородия почвы (табл. 1). Отчетливо влияние почвенно-растительных условий проявляется в насаждении на ППП № 10, созданном на маломощных дерново-карбонатных почвах, сформировавшихся на известняках и доломитах. Здесь значительно снижены полнота, запас и текущий прирост древостоя. Кроме того, необходимо учитывать, что с возрастом происходит уменьшение прироста по запасу, выпадение отдельных деревьев из состава древостоев, что сопровождается снижением величины прироста (Таранков, 2000).

Исследования продуктивности насаждения, как правило, включают анализ структуры, динамики запасов стволовой древесины и фракций фитомассы. Фитомасса является ключевым компонентом природного углеродного цикла и итогом валовой первичной продукции биогеоценоза (Борисенков, Кондратьев, 1988). Результаты расчетов фракционированных запасов фитомассы искусственных насаждений с участием дуба, выраженные в тоннах абсолютно сухой массы на единицу площади, обобщены в табл. 2.

Таблица 2. Фракционированные запасы фитомассы искусственных насаждений дуба в Майкопском лесничестве

№ ППП	Состав насаждения	Фитомасса, т/га				
		ствола	ветвей	корней	листьев	Всего...
Монодоминантные насаждения дуба						
1	10ДГ+Г+КЛП	192.24	38.45	28.84	7.69	267.22
2	10ДЧ+Г	217.71	43.54	32.66	8.71	302.61
Смешанные насаждения с преобладанием дуба						
3	5ДЧ3Г2КЛП	299.67	59.94	44.95	11.99	416.55
4	5ДК2ДЧ1Г2ОС	73.65	14.73	11.05	2.95	102.37
7	6ДЧ4Г+БК	82.57	16.51	12.39	3.30	114.78
Смешанные насаждения с преобладанием спутников дуба						
5	5ДЧ5Г+БК	63.72	12.74	9.56	2.55	88.57
6	4ДЧ5Г1БК	45.35	9.07	6.80	1.81	63.04
8	3ДЧ5Г2БК	71.25	14.25	10.69	2.85	99.05
9	3ДЧ5Г2БК+ОС	47.42	9.48	7.11	1.90	65.92
10	4ДЧ3Г2БК1ОЛЧ+ОС	32.72	6.54	4.91	1.31	45.49
11	4ДЧ3Г2БК1ОЛЧ+ОС	36.79	7.36	5.52	1.47	51.14

Запасы фитомассы древостоя изменяются значительно в пределах от 45.49 до 416.55 т/га, прежде всего, в зависимости от состава древостоя. Очевидной закономерностью является увеличение суммарных запасов фитомассы при увеличении доли участия дуба (рис. 1). Так, в монодоминантных дубравах Лесосеменного участкового лесничества суммарная фитомасса достигала 302.6 т/га, в то время как в смешанных древостоях с доминированием граба (*Carpinus betulus* L.) и бука (*Fagus orientalis* Lipsky)

фитомасса не превышала 100 т/га. Необходимо отметить, что максимальная величина фитомассы, отмеченная в смешанном дубово-грабово-кленовом насаждении, составляла 416.6 т/га, однако и в данном случае вклад дуба по запасу стволовой древесины оказался максимальным в сравнении с другими видами древесных пород. В этой связи фитомасса изученных древостоев была пропорциональна его запасу (рис. 2, А) и, соответственно, текущему приросту.

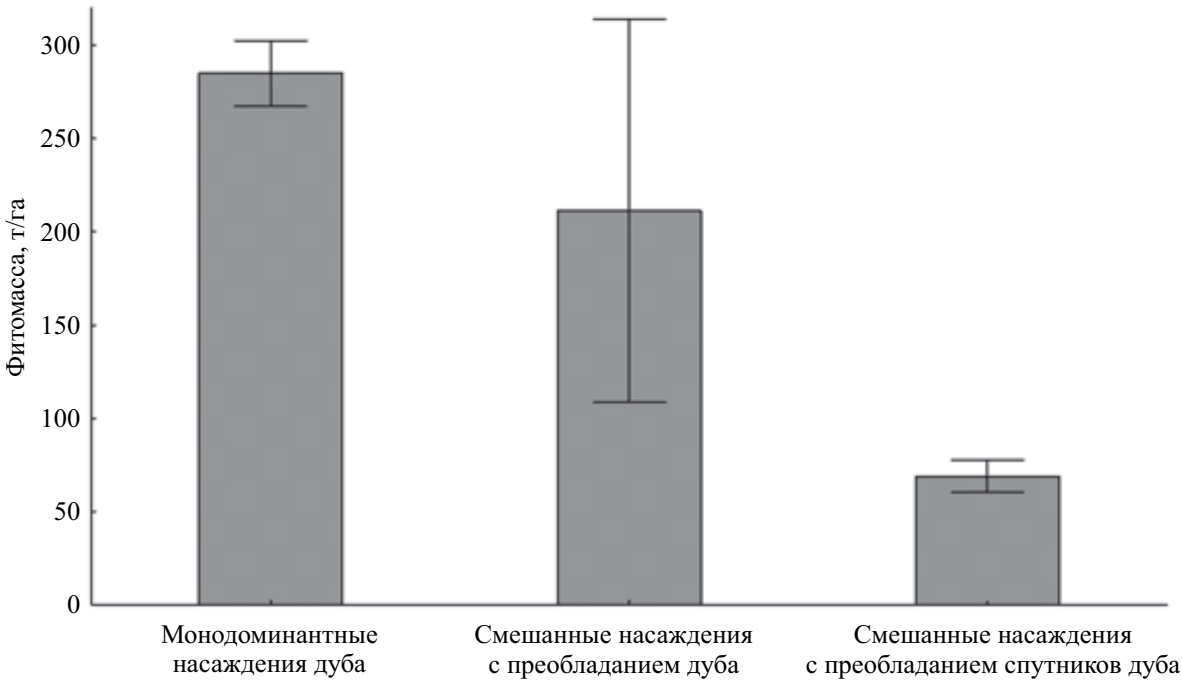


Рис. 1. Средние запасы суммарной фитомассы в искусственных насаждениях дуба Майкопского лесничества.

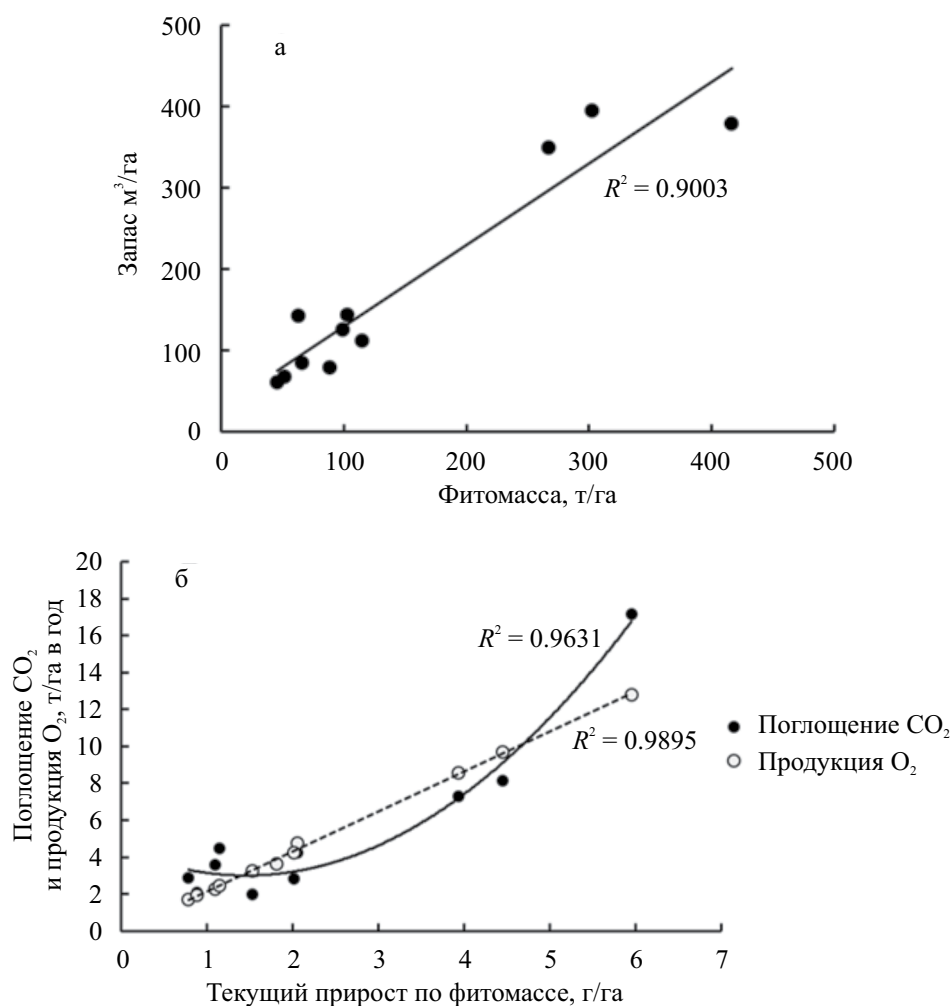


Рис. 2. Зависимость запаса древесины от фитомассы (а), а также годичного поглощения углекислого газа и продукции кислорода от текущего прироста фитомассы (б) в искусственных насаждениях с участием дуба в Майкопском лесничестве.

Характерные особенности продукционных показателей древостоев, а также их потенциал углерододепонирования и кислородопродуцирования искусственных насаждений можно оценить на основе данных, представленных в табл. 3.

Анализ данных табл. 3 позволяет судить о сравнительно высокой продуктивности монодоминантных насаждений дуба в предгорьях Северного Кавказа, это же суждение относится и к насаждениям с преобладающей долей дуба в составе. Текущий прирост фитомассы в таких насаждениях изменялся в диапазоне от 2.01 до 5.95 т/га в год, достигая максимума в смешанных насаждениях с преобладанием дуба черешчатого (ППП № 3). Монокультуры дуба Гартвиса (*Quercus hartwissiana* Steven) (ППП № 1) также характеризовались высокой продуктивностью, в которых фитомасса ежегодно увеличивалась на 4.45 т/га, что эквивалентно ежегодной аккумуляции 1.98 тонны углерода на единицу площади. Заметим, что введение дуба красного (*Quercus rubra* L.) в состав древостоя

(ППП № 4) не привело к существенному повышению продуктивности, и текущий прирост фитомассы и углероды фитомассы в таких дубравах составили 2.05 и 1.15 т/га соответственно. В то же время общее снижение доли дуба в насаждении и увеличение вклада сопутствующих древесных пород приводило к снижению годичного прироста фитомассы, который в таких насаждениях не превышал 1.81 т/га. Ежегодная аккумуляция углерода в этих древостоях оказалась менее 1.0 т/га.

Так, годичный прирост фитомассы сопоставим или даже выше, чем в нагорных дубравах южной лесостепи, где на продукцию фитомассы древостоя приходится от 1.3 до 3.8 т/га в год (Экосистемы... 2004). В итоге средневозрастные искусственные древостои с участием дуба в Майкопском лесничестве к 50—70 гг. аккумулировали в своей надземной и подземной фитомассе от 31 до 328 тонн углерода на 1 га. Учитывая эти особенности, следует отметить, что средневозрастные искусственные дубравы в предгорьях

Таблица 3. Продукционные показатели, поглощение углекислого газа и продукция кислорода в искусственных насаждениях с участием дуба в Майкопском лесничестве Республики Адыгеи

№ ППП	Состав насаждения	Текущий прирост фитомассы, т/га в год	Запасы углерода фитомассы, т/га	Текущий прирост углерода фитомассы, т/га в год	Суммарная продукция кислорода, т/га	Годичная продукция кислорода, т/га в год	Суммарное поглощение CO ₂ , т/га	Годичное поглощение CO ₂ , т/га в год
Монодоминантные насаждения дуба								
1	10ДГ+Г+КЛП	3.93	134.83	1.98	582.85	8.57	494.82	7.27
2	10ДЧ+Г	4.45	150.87	2.22	659.71	9.70	553.69	8.14
Смешанные насаждения с преобладанием дуба								
3	5ДЧ3Г2КЛП	5.95	327.55	4.67	895.07	12.79	1202.10	17.17
4	5ДК2ДЧ1Г2ОС	2.05	57.66	1.15	237.74	4.75	211.61	4.23
7	6ДЧ4Г+БК	2.01	44.97	0.78	240.59	4.22	165.04	2.84
Смешанные насаждения с преобладанием спутников дуба								
5	5ДЧ5Г+БК	1.53	31.43	0.54	188.62	3.25	115.34	1.98
6	4ДЧ5Г1БК	1.09	58.43	0.97	132.17	2.28	214.43	3.57
8	3ДЧ5Г2БК	1.81	57.22	1.00	210.87	3.64	209.99	3.68
9	3ДЧ5Г2БК+ОС	1.14	70.34	0.78	141.43	2.44	258.15	4.45
10	4ДЧ3Г2БК1ОЛЧ+ОС	0.78	45.47	0.57	98.93	1.71	166.87	2.87
11	4ДЧ3Г2БК1ОЛЧ+ОС	0.88	32.87	0.39	113.32	1.95	120.63	2.08

Северного Кавказа имеют в среднем сопоставимые запасы углерода с перестойными нагорными дубравами южной лесостепи (~150 тС/га) и аналогичный диапазон варьирования — от ~30 до ~300 тС/га (Экосистемы... 2004). Для сравнения также укажем, что сходные запасы углерода (88—232 тС/га) отмечались в 50—60-летних искусственных древостоях с участием дуба в условиях Карачаево-Черкесии (Kulakova, 2021), а также дубравах горных районов Непала — от 78.6 до 251.1 тС/га (Poudel et al., 2020). В лесах с преобладанием дуба в Грузии суммарный запас углерода фитомассы оказался в среднем ниже и составил, по данным G. Vachnadze с соавторами (Vachnadze et al., 2018), 41.6 тС/га, что сопоставимо с низкопродуктивными смешанными древостоями Майкопского лесничества, где дуб не формирует основную часть древостоя.

Поглощение углекислого газа из атмосферы в процессе фотосинтеза и кислородопроизводящая функция древостоев тесно взаимосвязаны между собой и напрямую зависят от ежегодного прироста фитомассы (рис. 26). Поэтому очевидно, что наибольшей углероддепонирующей и кислородопроизводящей способностью характеризуются насаждения Лесосеменного участка лесничества, где отмечаются наиболее высокие годовые показатели. Годичная аккумуляция углекислого газа лесами тем не менее

изменяется пропорционально приросту фитомассы в очень широких пределах от 1.98 до 17.17 т CO₂/га в год, а годичная продукция кислорода составляет 1.71—12.79 т/га в год. Сравнительный анализ подтверждает значительный потенциал монодоминантных дубовых древостоев в секвестрации углерода и продуцировании кислорода в сравнении со смешанными многовидовыми насаждениями, где доля дуба сильно снижена (рис. 3). Например, в древостоях дуба черешчатого и дуба Гартвиса поглощение составляет в среднем 7.7 ± 0.6 т CO₂/га, а выделение O₂ достигает 9.1 ± 0.8 т O₂/га, в то время как в смешанных дубово-грабово-буковых древостоях с примесью ольхи (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) и/или осины (*Populus tremula* L.) отмечено снижение показателей до 3.1 ± 1.0 т CO₂/га и 2.6 ± 0.8 т O₂/га.

В среднем на единицу площади искусственные дубравы Майкопского лесничества поглощали 5.3 ± 4.4 т CO₂ в год и выделяли в атмосферу 5.0 ± 3.7 т CO₂ в год. Это по меньшей мере в два раза больше, чем в дубравах Грузии (Vachnadze et al., 2018), где оценочные величины составили для поглощения углекислого газа 2.3 т/га в год, а для продукции кислорода — 1.8 т/га в год, но сопоставимо с уровнями поглощения CO₂ и продуцирования O₂ в лесах Карачаево-Черкесии (Kulakova, 2021). Значительный потенциал связывания углерода и, соответственно,

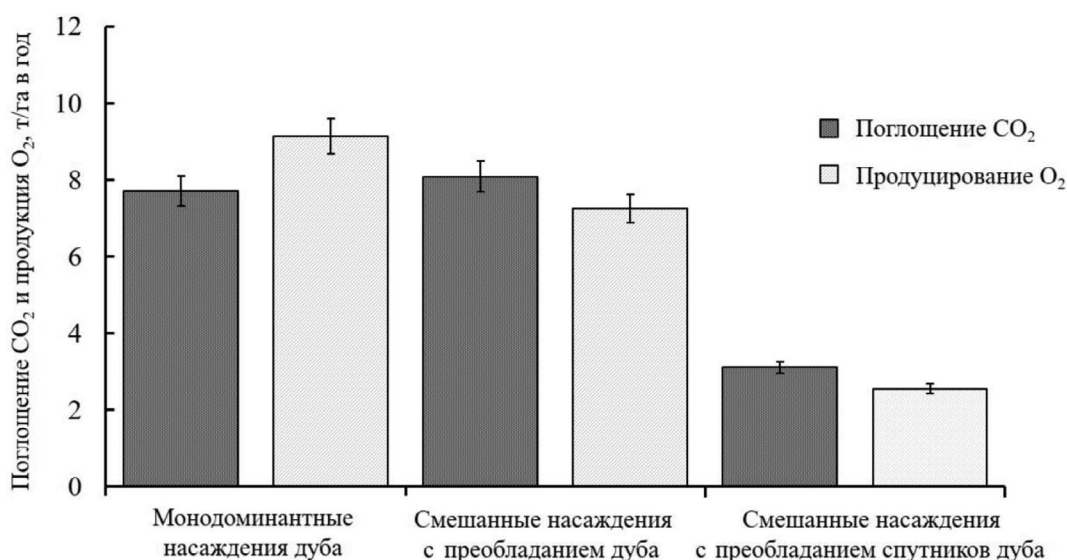


Рис. 3. Годичное поглощение углекислого газа и годичная продукция кислорода в искусственных насаждениях дуба Майкопского лесничества.

кислородопродуцирования в лесах Северного Кавказа неразрывно связан с историческими моделями лесопользования. На месте обширных вырубок в период с 1945 по 1975 гг. возникли естественным образом или созданы искусственно новые лесные насаждения, интенсивно поглощающие атмосферный углерод. Благодаря современным методам лесопользования и весьма ограниченному распространению разрушительных лесных пожаров потери углерода значительно ниже общего прироста фитомассы (Бакаева, Замолотчиков, 2009).

Разные виды древесных пород оказывают различное влияние на поглощение и накопление углерода в лесах, поскольку имеют разную скорость поглощения углерода и его удержания в биомассе. Вместе с тем многие исследователи находят подтверждение тому факту, что многовидовые смешанные древостои обеспечивают более эффективное связывание атмосферного углерода и характеризуются наибольшими его запасами (Lazaro-Lobo et al., 2023; Warner et al., 2023; Sidik, 2023). Другие исследователи отмечают, что общие запасы углерода в смешанных древостоях в среднем могут быть такими же, как и в наиболее продуктивных монокультурах (Osei et al., 2022), а результаты третьих свидетельствуют, что смешанные древостои имеют более низкий уровень накопления углерода по сравнению с чистыми хвойными и широколиственными насаждениями (Bulut, Günlü, 2019; Rodriguez De Prado et al., 2023). В настоящем исследовании получены результаты, подтверждающие последнюю позицию. По-видимому, в условиях предгорий Северного Кавказа в целях повышения секвестрационного потенциала и продукции кислорода наиболее эффективной стратегией лесовосстановления является искусственное создание чистых и смешанных культур с преобладанием

дуба семенного происхождения взамен смешанных многовидовых древостоев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований доказан высокий потенциал поглощения углекислого газа и продукции кислорода искусственными насаждениями с участием или доминированием дуба в предгорьях Северного Кавказа. При этом показано, что породный состав и почвенно-растительные условия оказывают существенное влияние на продуктивность насаждений. Эффективность углероддепонирующей и кислородопродуцирующей функций древостоев находится в прямой зависимости от продуктивности их фитомассы. В возрасте от 50—70 лет дубовые насаждения в Майкопском лесничестве Республики Адыгеи интенсивно поглощают углекислый газ, депонируют углерод и выделяют кислород в отличие от многовидовых древостоев, где преобладающая роль принадлежит древесным породам-спутникам дуба. Продуктивность последних снижена, и поэтому их потенциал обеспечения экосистемных услуг по секвестрации углерода и кислородопродуцированию не высок. Таким образом, оптимальным подходом к увеличению секвестрации углерода в этих условиях будет целенаправленное выращивание чистых и смешанных лесов с преобладанием дуба, в отличие от практики создания разнообразных многовидовых древостоев с участием граба и бука.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бакаева З.М., Замолотчиков Д. Г. Запасы и потоки углерода в лесах Северного Кавказа // Известия

высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2009. № 5 (153). С. 78—82.

Борисенков Е. П., Кондратьев К. Я. Круговорот углерода и климат. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 320 с.

Уткин А. И., Замолотчиков Д. Г., Честных О. В. Пулы углерода фитомассы, биологического углерода и азота почв в лесном фонде России // Известия РАН. Серия географическая. 2006. № 2. С. 18—34.

Калининченко Н. П. Дубравы России. М.: ВНИИЦлесресурс, 2000. 536 с.

Кулакова Е. Н., Чернодубов А. И. Искусственные лесные насаждения восточной части Северного Кавказа // Лесотехнический журнал. 2016. Т. 6. № 2(22). С. 30—36.

Кулакова Е. Н., Чернодубов А. И., Манаенков А. С. Эколого-экономическая оценка искусственных лесных насаждений предгорий Карачаево-Черкесской Республики // Лесотехнический журнал. 2017. Т. 6. № 4(24). С. 13—21.

Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990—2021 гг. [Электронный ресурс] // М.: ИГКЭ, Росгидромет, 2023. Ч. 2. 103 с. URL: <http://www.igce.ru/performance/publishing/reports/> (дата обращения: 13.11.2023).

ОСТ 56-69-83. Пробные площади лесоустроительные. Метод закладки. М., 1983. 24 с.

Таранков В. И. Мониторинг лесных экосистем. Воронеж: ВГЛТА, 2006. 300 с.

Таранков В. И. Особенности циклической динамики прироста древесных пород в различных лесорастительных условиях // Восстановление лесов, ресурсо- и энергосберегающие технологии лесного комплекса. Воронеж, ВГЛТА, 2000. С. 130—134.

Экосистемы Теллермановского леса / под ред. В. В. Осипова. Ин-т лесоведения. М.: Наука, 2004. 340 с.

Bulut S., Günlü A. Determination of Total Carbon Storage using Sentinel-2 and Geographic Information Systems in Mixed Forests // Anatolian Journal of Forest Research. 2019. V. 5. № 2. P. 127—135.

Chameides W. L., Perdue E. M. Biogeochemical Cycles: A Computer-Interactive Study of Earth System Science and Global Change (Computer-Based Earth System Science Series). Biogeochemical cycles. New York: Oxford University Press, 1997. 224 p.

Gou Q., Gao M., Wang G. Multi-functional characteristics of artificial forests of *Caragana korshinskii* Kom with different plantation ages in the hilly and sandy area of Northwest Shanxi, China // Land Degradation & Development. 2023. № 14(34). P. 4195—4207.

Kulakova E. Carbon sequestration in artificial forest stands of the Karachayevo-Cherkessian Republic // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. № 1(875). P. 012022.

Lázaro-Lobo A. et al. Quantifying carbon storage and sequestration by native and non-native forests under contrasting climate types // Global Change Biology. 2023. № 16(29). P. 4530—4542.

Nave L. E. et al. The role of reforestation in carbon sequestration // New Forests. 2019. V. 50. № 1. P. 115—137.

Noulékoun F., Mensah S., Birhane E., Son Y., Khamzina A. Forest Landscape Restoration under Global Environmental Change: Challenges and a Future Roadmap // Forests. 2021. V. 12. № 3. P. 276.

Osei R. et al. The distribution of carbon stocks between tree woody biomass and soil differs between Scots pine and broadleaved species (beech, oak) in European forests // European Journal of Forest Research. 2022. V. 3. № 141. P. 467—480.

Poudel A., Sasaki N., Abe I. Assessment of carbon stocks in oak forests along the altitudinal gradient: A case study in the Panchase Conservation Area in Nepal // Global Ecology and Conservation. 2020. V. 23. P. e01171.

Rodriguez De Prado D. et al. Can mixed forests sequester more CO₂ than pure forests in future climate scenarios? A case study of *Pinus sylvestris* combinations in Spain // European Journal of Forest Research. 2023. V. 1. № 142. P. 91—105.

Sidik S. Diverse Forests Store More Carbon Than Monocultures // Eos. 2023. V. 104.

Tognetti R., Smith M., Panzacchi P. Climate-Smart Forestry in Mountain Regions. Springer Nature, 2021. 574 p.

Vachnadze G. et al. Carbon Stock Sequestered in the phytocenosis of oak forests in Georgia // Annals of Agrarian Science. 2018. V. 4. № 16. P. 476—480.

Von Holle B., Yelenik S., Gornish E. S. Restoration at the landscape scale as a means of mitigation and adaptation to climate change // Current Landscape Ecology Reports. 2020. V. 5. № 3. P. 85—97.

Warner E. et al. Young mixed planted forests store more carbon than monocultures — a meta-analysis // Frontiers in Forests and Global Change. 2023. V. 6. P. 1226514.

Carbon Depositing and Oxygen Emission in Artificial Oak Stands of Maykop Forestry District of the Adygea Republic

E. N. Shtepa^{1,*}, S. S. Sheshnitsan¹, V. Yu. Kulakov²

¹ Voronezh State University of Forestry and Technology,
Timiryazeva st. 8, Voronezh, 394087 Russian Federation

² Academic Centre for forest planning and innovations, LLC
Moskovskiy ave. 19, Voronezh, 394026 Russian Federation

* E-mail: kulakova_92@list.ru

Mountain and foothill forests provide many essential ecosystem services, but land use changes such as deforestation or, conversely, afforestation and reforestation can significantly impact their potential. Artificial forest stands can perform similar functions, but their effectiveness depends on species composition, age and management methods. Reforestation in these areas is critical to mitigating and adapting to climate change, increasing biodiversity and conserving water resources. Artificial forest stands in the North Caucasus were created with the aim of increasing the productivity of oak forests, and thanks to these measures, forest cover in the Republic of Adygea turned out to be significantly higher than in neighbouring regions. The purpose of the study was to assess the carbon-depositing and oxygen-producing role of artificial forest stands with oak in the foothills of the North Caucasus within the Republic of Adygea. It was found that in pure 70-year-old oak plantations the maximum increase in timber volume was 5.81 m³/ha per year, and the mixed 58-year-old oak stands were characterised by the minimum increase value, 1.04 m³/ha per year. The intensity of carbon accumulation and oxygen production was calculated through the increase in phytomass. The results showed that as the share of oak in the forest stand increased, production indicators and sequestration potential increased significantly. Artificial plantings of the Maikop forestry have accumulated in their above-ground and underground phytomass from 31 to 328 t C/ha. The annual accumulation of CO₂ by forests varied from 1.98 to 17.17 t/ha per year, and the annual production of O₂ was 1.71–12.79 t/ha per year. It has been proven that in order to increase the sequestration potential in the North Caucasus foothills, one of the most effective approaches may be targeted cultivation of pure and mixed forests with a predominance of seed oak, rather than the creation of a variety of multi-species plantations, including hornbeam and beech.

Key words: oak forests, North Caucasus foothills, phytomass, current growth, annual sequestration of carbon dioxide, oxygen production, ecosystem services, mitigation

REFERENCES

- Bulut S., Günlü A., Determination of Total Carbon Storage using Sentinel-2 and Geographic Information Systems in Mixed Forests, *Anatolian Journal of Forest Research*, 2019, vol. 5, no. 2, pp. 127–135.
- Chameides W. L., Perdue E. M., *Biogeochemical Cycles: A Computer-Interactive Study of Earth System Science and Global Change (Computer-Based Earth System Science Series)*, Biogeochemical cycles, New York: Oxford University Press, 1997, 224 p.
- Gou Q., Gao M., Wang G., Multi-functional characteristics of artificial forests of *Caragana korshinskii* Kom with different plantation ages in the hilly and sandy area of Northwest Shanxi, China, *Land Degradation & Development*, 2023, no. 14 (34), pp. 4195–4207.
- Kulakova E., Carbon sequestration in artificial forest stands of the Karachayev-Cherkessian Republic, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, no. 1 (875), pp. 012022.
- Lázaro-Lobo A. et al., Quantifying carbon storage and sequestration by native and non-native forests under contrasting climate types, *Global Change Biology*, 2023, no. 16(29), pp. 4530–4542.
- Nave L. E. et al., The role of reforestation in carbon sequestration, *New Forests*, 2019, vol. 50, no. 1, pp. 115–137.
- Noulèkoun F., Mensah S., Birhane E., Son Y., Khamzina A., Forest Landscape Restoration under Global Environmental Change: Challenges and a Future Roadmap, *Forests*, 2021, vol. 12, no. 3, pp. 276.
- Osei R. et al., The distribution of carbon stocks between tree woody biomass and soil differs between Scots pine and broadleaved species (beech, oak) in European forests, *European Journal of Forest Research*, 2022, vol. 3, no. 141, pp. 467–480.
- Poudel A., Sasaki N., Abe I., Assessment of carbon stocks in oak forests along the altitudinal gradient: A case study in the Panchase Conservation Area in Nepal, *Global Ecology and Conservation*, 2020, vol. 23, p. e01171.

- Rodriguez De Prado D. et al., Can mixed forests sequester more CO₂ than pure forests in future climate scenarios? A case study of *Pinus sylvestris* combinations in Spain, *European Journal of Forest Research*, 2023, vol. 1, no. 142, pp. 91–105.
- Sidik S., Diverse Forests Store More Carbon Than Monocultures, *Eos*, 2023, vol. 104.
- Tognetti R., Smith M., Panzacchi P., *Climate-Smart Forestry in Mountain Regions*, Springer Nature, 2021, 574 p.
- Vachnadze G. et al., Carbon Stock Sequestered in the phytocenosis of oak forests in Georgia, *Annals of Agrarian Science*, 2018, vol. 4, no. 16, pp. 476–480.
- Von Holle B., Yelenik S., Gornish E. S., Restoration at the landscape scale as a means of mitigation and adaptation to climate change, *Current Landscape Ecology Reports*, 2020, vol. 5, no. 3, pp. 85–97.
- Warner E. et al., Young mixed planted forests store more carbon than monocultures — a meta-analysis, *Frontiers in Forests and Global Change*, 2023, vol. 6, p. 1226514.
- Kalinichenko N. P., *Dubravyy Rossii* (Oak-forests of Russia), Moscow: VNIITslesresurs, 2000, 536 p.
- Tarankov V. I., *Monitoring lesnykh ekosistem* (Monitoring of forest ecosystems), Voronezh: VGLTU, 2006, 300 p.
- Ekosistemy Tellermanovskogo lesa* (Ecosystems of Tellermanovskii forest), Moscow: Nauka, 2004, 339 p.
- Bakaeva Z. M., Zamolodchikov D. G., Zapasy i potoki ugleroda v lesakh Severnogo Kavkaza (Carbon pools and fluxes in forests of Northern Caucasasia), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Seriya: Estestvennyye nauki*, 2009, no. 5(153), pp. 78–82.
- Borisenkov E. P., Kondrat'ev K. Y., *Krugovorot ugleroda i klimat* (Carbon cycle and climate), Leningrad: Gidrometizdat, 1988, 320 p.
- Utkin A. I., Zamolodchikov D. G., Chestnykh O. V., Puly ugleroda fitomassy, biologicheskogo ugleroda i azota pochv v lesnom fonde Rossii (Pools of phytomass carbon, biological carbon and soil nitrogen in the Russian forest fund), *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*, 2006, no. 2, pp. 18–34.
- Kulakova E. N., Chernodubov A. I., Iskusstvennye lesnye nasazhdeniya vostochnoi chasti Severnogo Kavkaza (Artificial forest plantations eastern part of North Caucasus), *Lesotekhnicheskii zhurnal*, 2016, vol. 6, no. 2(22), pp. 30–36.
- Kulakova E. N., Chernodubov A. I., Manaenkov A. S., Ekologo-ekonomicheskaya otsenka iskusstvennykh lesnykh nasazhdenii predgorii Karachaevo-Cherkesskoi Respubliki (Ecological and economics evaluation of artificial forest plantations of the foothills of Karachay-Cherkess Republic), *Lesotekhnicheskii zhurnal*, 2016, vol. 6, no. 4(24), pp. 13–21.
- <http://www.igce.ru/performance/publishing/reports/> (November 13, 2023).
- OST 56-69-83*.
- Tarankov V. I., Osobennosti tsiklicheskoj dinamiki prirosta drevesnykh porod v razlichnykh lesorastitel'nykh usloviyakh (Features of the cyclic dynamics of growth of tree species in various forest conditions), In: *Vosstanovlenie lesov, resurso- i energosberegayushchie tekhnologii lesnogo kompleksa* (Forest restoration, resource- and energy-saving technologies of the forestry complex), Voronezh: VGLTA, 2000, pp. 130–134.