ТРУДЫ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
ИНСТИТУТА ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА

www.journal.spb-niilh.ru
ISSN 2079-6080

DOI 10.21178/2079-6080.2024.3.4
УДК 581.132.2

Результаты определения биологической продуктивности ювенильных растений гибридов тополей

© П.М. Евлаков[1], К.В. Жужукин[1], Т.А. Гродецкая[1], А.В. Константинов[2]

Results of determining the biological productivity of juvenile plants of poplar hybrids

P.M. Evlakov, K.V. Zhuzhukin, T.A. Gorodetskaya, A.V. Konstantinov (Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov; St. Petersburg Research Institute of Forestry)

Because of their longevity, forests can accumulate large amounts of organic matter, which is an important carbon sink for mitigating climate change. Thanks to their impressive growth rates, hybrid poplar species have become one of the most widely cultivated trees in temperate latitudes of Russia and around the world. In addition, poplars (*Populus* L.) are among the fastest growing temperate trees and are therefore of great commercial and climatic importance. This article presented an experimental study to determine the morphometric (dry and wet biomass, diameter, height, growth) indicators and biological productivity of juvenile poplar hybrids of four species: *P. alba* L. × *P. bolleana* Laurche, *P. deltoides* Marsh. × *P. balsamifera* L., *P. piramidalis* Ros.×*P. nigra* L., *P. nigra* L. Determination of morphometric parameters of plants was carried out in 2022 and 2023 during the intensive growth phase (August), age was 2 and 3 years, respectively. The highest indicators of biological productivity for 2023 were shown by the poplar hybrid 'E.s.-38', the wet biomass indicators for the stem, root and lateral branches were respectively equal to 4510 ± 541.2, 3445 ± 465.1 g, 2753 ± 347.8 g. When analyzing the number of lateral branches, a correlation was established with the indicator of dry and wet leaf biomass for all varieties and hybrids of poplars. The poplar hybrid 'E.s.-38' had the largest number of lateral branches – 64 pcs. on average per plant. The poplar hybrid 'E.s.-38' has the highest biological productivity with indicators of 37 and 18 t/ha for wet and dry biomass, respectively. Three other poplar genotypes turned out to be statistically indistinguishable from each other, and their biological productivity was 59 % and 51 % less than the intersectional hybrid "Voronezh Giant".

Key words: biological productivity, intensity of visible photosynthesis, dry and wet biomass, morphometric indicators, woody plants

Результаты определения биологической продуктивности ювенильных растений гибридов тополей

П.М. Евлаков, К.В. Жужукин, Т.А. Гродецкая, А.В. Константинов

Вследствие своей долговечности леса могут накапливать большое количество органического вещества, которое является важным поглотителем углерода для смягчения последствий изменения климата. Благодаря своим впечатляющим темпам роста, гибридные виды тополей стали одним из наиболее широко культивируемых деревьев в умеренных широтах России и по всему миру. Кроме того, тополя (*Populus* L.) являются одними из самых быстрорастущих деревьев умеренного пояса и поэтому имеют большое коммерческое и климатическое значение. В данной статье приведены результаты экспериментального исследования по определению морфометрических показателей (сухая и сырая биомасса, диаметр, высота, прирост) и биологической продуктивности ювенильных гибридов тополя четырех видов: *P. alba* L. × *P. bolleana* Laurche, *P. deltoides* Marsh. × *P. balsamifera* L., *P. piramidalis* Ros. × *P. nigra* L., *P. nigra* L. Определение морфометрических показателей растений проводили в 2022 и 2023 году в фазу интенсивного роста (август), возраст составлял 2 и 3 года соответственно. Наибольшие значения биологической продуктивности за 2023 год показал гибрид тополя 'Э.с.-38': результаты измерений сырой биомассы для стебля, корня и боковых ветвей были соответственно равны 4510 ± 541,2 г, 3445 ± 465,1 г, 2753 ± 347,8 г. При анализе количества боковых ветвей установлена корреляция с сухой и сырой биомассы листьев для всех сортов и гибридов тополей. Наибольшим количеством боковых ветвей обладал гибрид тополя 'Э.с.-38' – 64 шт. в среднем на одно растение. Самая высокая биологическая продуктивность проявилась у гибрида тополя 'Э.с.-38' с результатом 37 и 18 т/га для сырой и сухой биомассы соответственно. Три других генотипа тополей оказались статистически неотличимы друг от друга, а показатели их биологической продуктивности были меньше на 59 и 51 % относительно межсекционого гибрида «Воронежский гигант».

Ключевые слова: ювенильные древесные растения, тополь, гибриды, биологическая продуктивность, интенсивность видимого фотосинтеза, сухая и сырая биомасса, морфометрические показатели, woody plants?

Евлаков Петр Михайлович – заведующий лабораторией анализа ПЦР НИИ ИТЛК, канд. биол. наук
E-mail: peter.evlakov@yandex.ru

Жужукин Константин Викторович – ст. преподаватель кафедры химии и биотехнологии, канд. техн. наук
E-mail: kinkon18@yandex.ru

Гродецкая Татьяна Александровна – научный сотрудник лаборатории анализа ПЦР
E-mail: tatyana.pokusina@yandex.ru

Константинов Артем Васильевич –заместитель директора по научной работе, д-р биол. наук
E-mail: science@spb-niilh.ru

[1]Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова
394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8
Телефон: 8 (4732)538411

[2]Федеральное бюджетное учреждение «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства»
194021, Санкт-Петербург, Институтский пр., 21
Телефон: 8(812)552-80-21

Введение

Преимущество лесов перед большинством других типов экосистем заключается в их способности запасать значительное количество углерода в течение десятилетий [3], как в деревьях, так и в верхних слоях почвы. Таким образом леса смягчают повышение концентрации CO_2 в атмосфере. Величина наземного поглощения углерода за десятилетие 2007–2016 годов составила в среднем 3,0 ± 0,8 ПгС в год$^{-1}$ [6]. Повышение точности этих оценок стока углерода, его пространственного распределения и потенциала для его увеличения имеет решающее значение для поддержки будущих действий по смягчению последствий изменения климата. Вследствие своей долговечности леса могут накапливать большое количество органического вещества, которое недавно было объявлено важным поглотителем углерода для смягчения консеквенции антропогенных воздействий [1, 7].

Благодаря своим впечатляющим темпам роста гибридные виды тополей стали широко культивироваться в умеренных широтах России и по всему миру. Кроме того, тополя (*Populus* L.) являются одними из самых быстрорастущих деревьев, характерных для наиболее протяженного географического пояса и поэтому имеют большое коммерческое и климатическое значение [1, 3, 6].

Большая генетическая изменчивость, обнаруженная в пределах рода *Populus* [18, 13, 9], дает возможность отбирать высокопродуктивные генотипы данных древесных растений. Значительная скорость роста и накопление фитомассы тополя связывается с его обильным водопотреблением [5, 15, 24] и низкой чувствительностью к стрессовым факторам. Возрастающая вероятность сезонных засух [16, 23] и перспективы дефицита пресной воды подчеркивают важность таких характеристик в качестве критериев отбора для производства биомассы в будущих климатических условиях.

В нашей стране создан значительный генетический фонд отечественных и интродуцированных видов, форм, селекционных сортов и гибридов тополя. Однако этот видовой и особенно сортовой фонд тополя до сих пор мало известен широкому кругу специалистов, так как представлен лишь в отдельных коллекциях научных учреждений и недостаточно изучен.

Тополя являются одной из главных пород полезащитного лесоразведения в степных и лесостепных районах страны [8]. Защитные полосы из тополя раньше других вступают в эксплуатацию и уже со второго года начинают выполнять свои функции [21]. Ценность тополя как основного модельного растения для биологии деревьев обусловлена его многими полезными свойствами для физиологических и геномных исследований, включая скромный размер генома (~500M) [10], высокую способность к вегетативному размножению [16, 17], относительную простоту трансгенных манипуляций, быстрый рост [4, 20], наличие обширного числа межвидовых гибридов и разнообразных фенотипов.

Тополь высаживают вдоль арыков, каналов, дорог, по берегам рек и водохранилищ, применяют при рекультивации шахтных отвалов, облесении выработанных карьеров, геологических разработок и т. п. Он становится одним из значительных факторов рационального природопользования и охраны окружающей среды. Коммерческие насаждения тополя (*Populus* spp.), выращиваемые в рамках систем с коротким оборотом рубки, служат источником сырья для биоэнергетики и / или получения биопродуктов, способствуя занятости в сельских районах, а также принося пользу окружающей среде. Кроме того, эти насаждения вносят важный вклад в достижение низкоуглеродной биоэкономики. Также данная порода часто используется в качестве модельного вида для различных исследований, в том числе климатических и фотосинтетических.

Гибридные тополя являются одними из наиболее широко культивируемых лиственных пород для производства целлюлозы и древесины из-за их скорости роста, высокой эффективности использования света при фотосинтезе, высокой толерантности к биофизическому стрессу, легкой адаптации к различным видам почв.

Доступность высокоурожайных клонов в сочетании с многообещающими достижениями за счет генетического улучшения делают гибридный тополь привлекательным модельным древесным растением для производства этанола из биомассы древесины. Высокие годовые темпы производства надземной биомассы тополей вызывают значительный интерес к их способности поглощать углерод (С) в почве под древесными насаждениями. Это рассматривается как важное экосистемное дополнение, которое может помочь частично компенсировать антропогенные выбросы CO_2 в атмосферу. Тополя благодаря своему высокому водопотреблению и устойчивости к стрессовым факторам способны эффективно накапливать углерод в почве, что делает их ценными для борьбы с климатическими изменениями и улучшения качества окружающей среды [25]. Темпы роста тополя значительно различаются и зависят от влияния генетики, климата и способа ухода на выживание, конкуренцию и иммунную силу древостоя.

Реакция тополей на климатические условия различается в зависимости от вида [11], размеров растений [17], их возраста, структуры насаждений, качества почвы и генетического разнообразия между популяциями [22].

Тополь составляет основную часть искусственных насаждений в европейских странах. Использование биомассы для производства энергии является важной политикой Европейского Союза, направленной на смягчение последствий изменения климата за счет сокращения выбросов парниковых газов и обеспечения энергоснабжения за счет диверсификации источников энергии. Тополя активно использовались за пределами Европы, например, для удовлетворения спроса на целлюлозу лиственных пород в Северной Америке. Данные растения стали важным ресурсом в производстве бумаги и других целлюлозных изделий благодаря своей высокой скорости роста и качеству древесины. Китай также выращивает тополь в больших масштабах для удовлетворения потребностей в биоэнергетике. В Индии эта древесная порода занимает основное место в системе агролесоводства, особенно в северных регионах [12]. В связи с этим определение продуктивности и ростовых показателей деревьев тополя является весьма актуальной задачей, что и было целью данной работы.

Объекты и методика исследования

В качестве экспериментального материала использовали гибриды тополей, посаженных в 2021 году на экспериментальном калибровочном полигоне учебно-опытного лесхоза ВГЛТУ (г. Воронеж). Используемые растения были представлены следующими тополями: Межсекционный гибрид тополя ‘Э.с.-38’ (‘Воронежский гигант’, получен М.М. Вересиным от скрещивания тополя дельтовидного с бальзамическим); тополь ‘ПОК’ ('Пирамидально-осокоревый Камышинский’, выведен селекционером А.В. Альбенским при скрещивании *P. piramidalis* Ros. × *P. nigra* L.); тополь ‘Ведуга’. гибрид *Populus alba* L. × *Populus alba* L. var. *bolleana* Lauche., получен в 1976 г. А.П. Царевым.; тополь черный (осокорь) *Populus nigra* L. Площадь опытного участка составляла 0,53 га, количество учтенных растений на высаженной плантации – 216 экземпляров.

Работы проводились в конце вегетационного периода 2023 года. Определение морфометрических показателей включало в себя оценку динамики прироста высоты и диаметра для всех исследуемых древесных растений с мая по сентябрь, полученные данные усреднялись. Измерения диаметра и высоты проводили в 2022 и 2023 году в фазу интенсивного роста (август), возраст деревьев составлял 2 и 3 года, соответственно. Выкопку (по 3 растения в 3-х повторностях на каждый гибрид) для определения морфометрических показателей производили осенью 2023 года. Для определения сырой и сухой биомассы у каждого вида тополей в конце вегетационного периода было выкопано по три модельных растения, которые были разделены на фракции (рис. 1).

Для получения абсолютно сухого веса листья, стебли и корни высушивали в сухожаровом шкафу RS 422 Binder, (Германия) при температуре 80 ±2 °С. Биологическую продуктивность растений определяли исходя из густоты посадки (2500 растений на

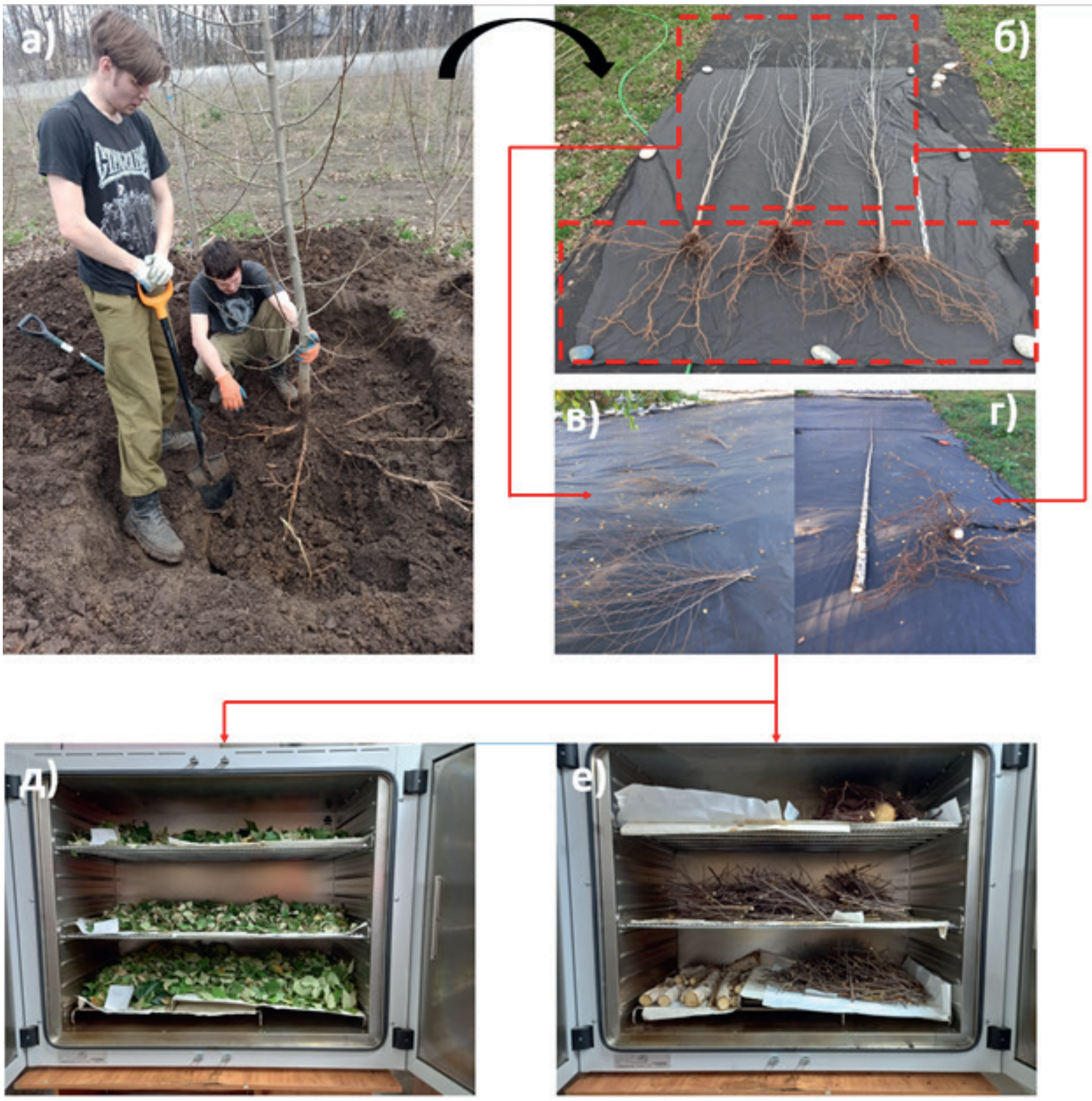

Рис. 1. Выкопка модельных деревьев для определения сухой и сырой биомассы (а, б); разделение модельных деревьев на фракции (в, г); высушивание листьев, корней, ствола и ветвей (д, е)

1 га) по результатам измерений средней сырой и сухой биомассы по формулам 1 и 2:

$$БП_{сыр} = \sum m_с, m_к, m_в, m_л \qquad (1)$$

где $m_с$, $m_к$, $m_в$, $m_л$ – сырая масса стебля, корня, ветвей и листьев, соответственно.

$$БП_{сух} = \sum m_{с1}, m_{к1}, m_{в1}, m_{л1} \qquad (1)$$

где $m_{с1}$, $m_{к1}$, $m_{в1}$, $m_{л1}$ – сухая масса стебля, корня, ветвей и листьев, соответственно.

Оводненность листьев (О) рассчитывали по разнице масс до и после высушивания всех листьев растений по формуле

$$О = \frac{m_{сыр.} - m_{сух.}}{m_{сыр.}} \cdot 100, \% \qquad (3)$$

где $m_{сыр.}$ – масса сырого листьев, г;

$m_{сух.}$ – масса сухого листьев, г.

Статистическую обработку полученных первичных данных проводили методом математической статистики с помощью прикладных программ Stadia. и Excel 2018, также использован стандартный пакет описательной статистики, однофакторный дисперсионный и корреляционный анализ.

Результаты исследования и их обсуждение

Биологическая продуктивность является одним из важнейших показателей, характеризующих скорость роста растений. В результате экспериментальных исследований определены величины сырой и сухой биомассы, количества боковых ветвей, оводненности листьев для четырех сортов и гибридов тополей в расчете на одно растение (рис. 2), а также результаты среднего прироста биомассы модельных деревьев относительно результатов 2022 года (рис. 3а-г). Наибольшие показатели биологической продуктивности за 2023 год были установлены для гибрид тополя ‘Э.с.-38’: величины сырой биомассы для стебля, корня и боковых ветвей были соответственно равны 4510 ± 541,2 г, 3445 ± 465,1 г, 2753 ± 347,8 г (рис. 2а). Биомасса тополя ‘Ведуга’ относительно ‘Э.с.-38’ снизилась на 44% и 72% для стебля и корня, и на 47% – для боковых ветвей. Существенных статистических различий между тремя генотипами тополей ‘Ведуга’, ‘ПОК’, ‘Осокорь’ не было выявлено при оценке сырой биомассы растений. Рассмотрение результатов сухой биомассы определил более сглаженные значения. Установлено, что наименьшими значениями биологической продуктивности обладал тополь ‘Осокорь’, у которого для стебля, корней и боковых ветвей значения сухой биомассы составляли 814 ± 97,4 г, 443 ± 56,8 г, 1063 ± 129,7 г, соответственно (рис. 2б, в). При анализе количества боковых ветвей установлена корреляция с показателем сухой и сырой биомассы листьев для всех сортов и гибридов тополей. Наибольшим количеством боковых

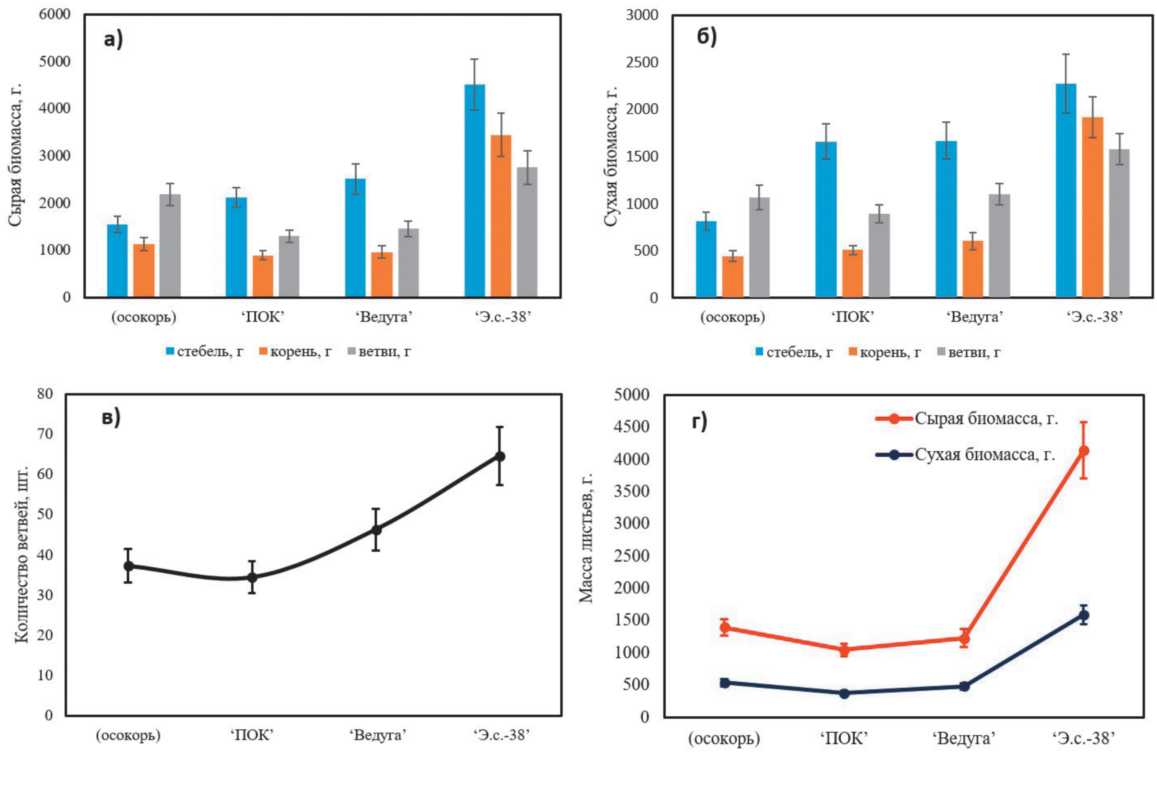

Рис. 2. Показатели сырой биомассы (а), сухой биомассы (б), количества ветвей (в), биомассы листьев (г) для четырех генотипов тополей

ветвей обладал гибрид тополя ‘Э.с.-38’ — 64 шт. в среднем на одно растение. Для трех других гибридов тополей статистических различий обнаружено не было. Оводненность листьев колебалась в диапазоне от 60,2 % (‘Ведуга’) до 62,3 % (‘ПОК’) (табл. 1).

Таблица 1

Показатели оводненности листьев для гибридов тополей

Показатель	Гибриды тополей			
	‘Э.с.-38’	‘Осокорь’	‘ПОК’	‘Ведуга’
Оводненность, %	61,6	61,1	62,3	60,2

Высокая водоудерживающая способность изучаемых гибридов может быть важным фактором при выборе растений для использования в условиях, где сохранение влаги является критически важным, например, в засушливых регионах или для создания устойчивых зеленых насаждений.

Показатели прироста сухой и сырой биомассы быстрорастущих тополей за 2023 год относительно 2022 года представлены на рисунке 3. Значительное увеличение значений сырой биомассы наблюдалось для всех сортов и гибридов тополей, что во многом может быть связано с благоприятными погодными условиями роста и развития вегетационного периода 2023 года. Наибольший прирост сухой и сырой биомассы в абсолютных значениях показали представители черных тополей ‘Осокорь’ и ‘ПОК’, а также сорт белого тополя ‘Ведуга’. Для гибрида тополя ‘Э.с.-38’ установлено увеличение показателей биомассы практически в два раза.

На рисунке 4 представлены результаты определения показателей прироста диаметра и высоты растений для гибридов тополей.

Наибольшая высота растений была наблюдалась у межсекционного гибрида тополя третьего года жизни ‘Э.с.-38’ — 598 см, прирост за вегетационный период составил

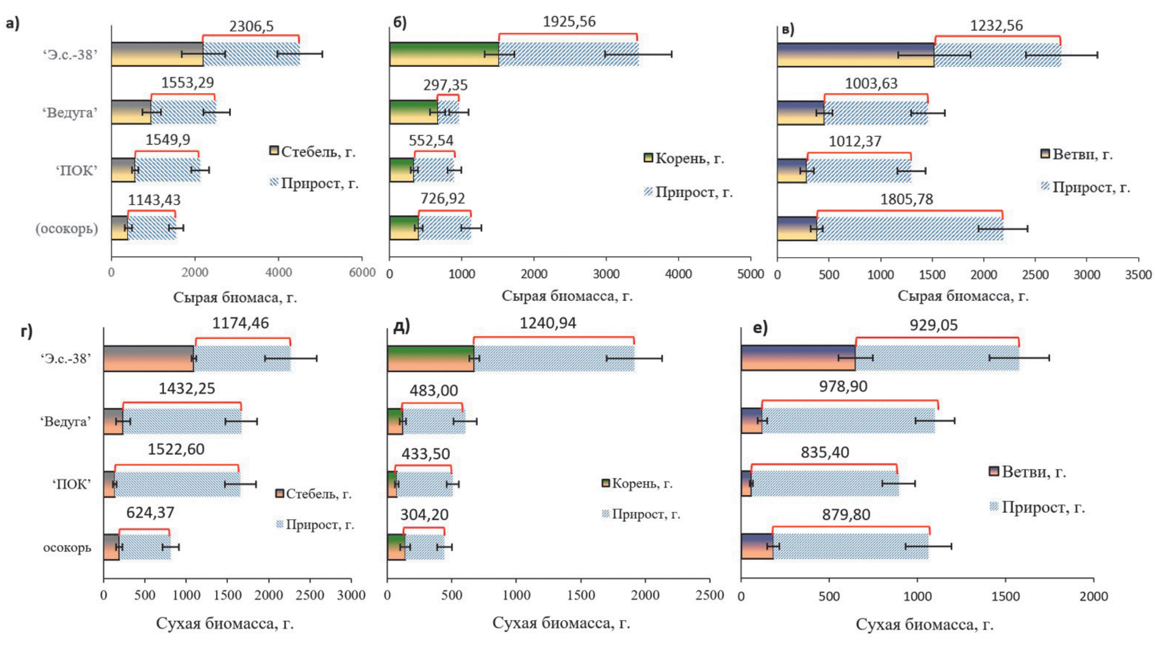

Рис. 3. Показатели прироста сырой биомассы (а—в) и сухой биомассы (г—е) тополей за 2023 год относительно данных 2022 года

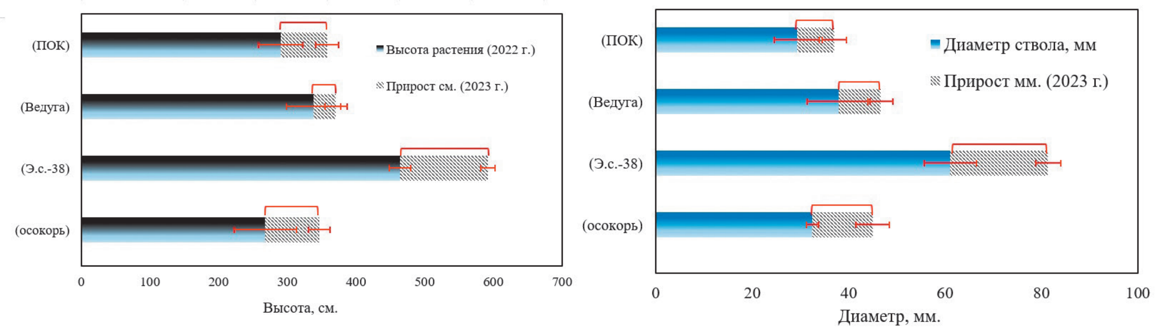

Рис. 4. Показатели высоты и диаметра гибридов тополей

128 см. Изменения в приросте диаметра в значительной степени коррелировало с показателем высоты, наибольший прирост среди тополей установлен также для гибрида ‘Э.с.-38’ – 20,3 мм.

При оценке биологической продуктивности тополей использовали одинаковые параметры густоты при посадке – 2500 растений на 1 га. Продуктивность, определенная по показателям сухой и сырой биомассы на единицу площади (1 га), представлена на рисунке 5.

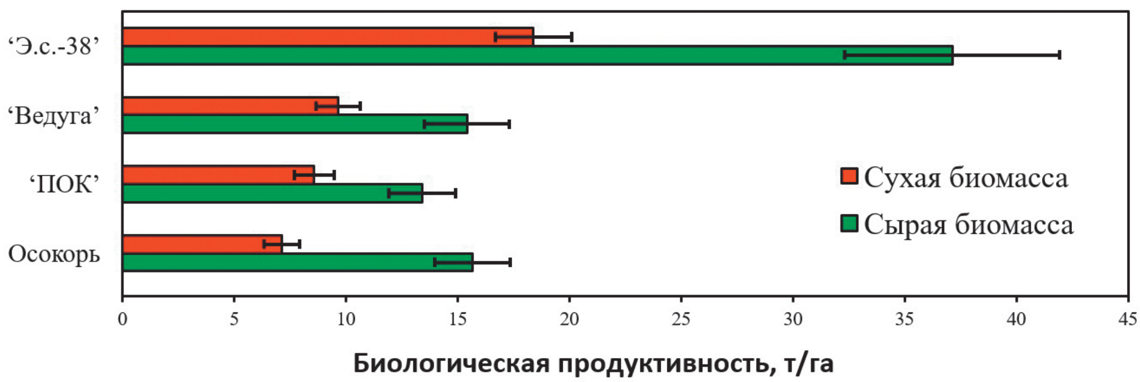

Рис. 5. Биологическая продуктивность гибридов тополей
по показателям сухой и сырой биомассы

Наибольшие показатели получены по гибриду тополя ‘Э.с.-38’: 37 и 18 т/га для сырой и сухой биомассы, соответственно. Три других генотипа тополей оказались статистически неотличимы друг от друга, а величина их биологической продуктивности был меньше на 59, 54 и 51% относительно ‘Э.с.-38’.

Высокие показатели ростовых процессов для межсекционного гибрида тополя ‘Э.с.-38’ хорошо согласуются с данными по площади отдельного листа и суммарной ассимиляционной поверхности целого растения, полученными ранее [2], которые были максимальными для изученных генотипов тополей. Кроме того, для быстрорастущего гибрида характерны также высокие показатели функциональной активности листового аппарата, которые составляют в фазу интенсивного роста от 25 до 31 мкмоль $CO_2/м^2/с$ [2]. В результате эффективного функционирования ассимиляционной поверхности хорошо развитой кроны гибрид тополя ‘Э.с.-38’ сформировал максимальную биологическую продуктивность на экспериментальном калибровочном полигоне в условиях Воронежской области.

Выводы

В результате проведенных исследований в течение вегетационного периода 2023 года определены морфометрические характеристики 4-х видов тополей (высота, диаметр прирост диаметра, сухой и сырой биомасс листьев, стебля, корня, ветвей). Наибольшие морфометрические показатели за среди тополей показал гибрид ‘Э.с.-38’ («Воронежский гигант»), значения сырой биомассы для стебля, корня и боковых ветвей были соответственно равны 4510 ± 541,2 г, 3445 ± 465,1 г, 2753 ± 347,8 г.

Определена биологическая продуктивность древостоев из этих видов тополей (с учетом высадки 2500 шт./га), для гибрида ‘Э.с.-38’ это 37 и 18 т/га для сырой и сухой биомассы соответственно. Три других генотипа тополей оказались статистически неотличимы друг от друга, а исследуемый показатель для них был меньше на 59 и 51% относительно ‘Э.с.-38’.

Исследуемые гибриды тополей показали различные результаты оводненности листа, самый высокий показатель установлен у ‘ПОК’ – 62,3%, однако различия между гибридами были незначительны.

Исследование проводилось в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 1023013000020–6–4.1.2 «Отбор хозяйственно ценных и устойчивых к изменению климата древесных культур, отличающихся высокой биологической продуктивностью и потенциалом секвестрации углерода с учетом региональных почвенно-климатическим особенностей для реализации лесоклиматических проектов (FZUR-2023–0002)».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Евлаков, П.М. Оценка углерододепонирующей способности быстрорастущих тополей / П.М. Евлаков, Т.А. Гродецкая, И.А. Болтнев // Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса : Сборник научных трудов XVI Международной научно-практической конференции в рамках XXVI Агропромышленного форума юга России и выставки «Интерагромаш» и «Агротехнологии», Ростов-на-Дону, 01–03 марта 2023 года / Донской государственный технический университет. – Ростов-на-Дону : Общество с ограниченной ответственностью "ДГТУ-ПРИНТ", 2023. – С. 116–117. – DOI: 10.23947/interagro.2023.116-117. – EDN HUPZGX.
2. Евлаков, П.М. Количественные оценки суточной динамики секвестрации углерода ювенильными растениями березы, тополя и сосны обыкновенной / П.М. Евлаков, К.В. Жужукин, Т.А. Гродецкая, А.В. Константинов // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2024. – № 2. – С. 17–28. – DOI 10.21178/2079-6080.2024.2.17. – EDN CEFQDA.
3. Когут, Б.М. Дегумусирование и почвенная секвестрация углерода / Б.М. Когут, В.М. Семенов, З.С. Артемьева, Н.Н. Данченко // Агрохимия. – 2021. – № 5. – С. 3–13.
4. Соломенцева, А.С. Состояние древесных растений на объектах защитного лесоразведения и озеленения Калачевского района Волгоградской области / А.С. Соломенцева // Изв. вузов. Лесной журнал. – 2022. – № 5. – С. 58–72.
5. Alaejos, J. Biomass Production and Quality of Twelve Fast-Growing Tree Taxa in Short Rotation under Mediterranean Climate / J. Alaejos, R. Tapias, F. López [et al.] // Forests. – 2023. – Vol. 14, № 6. – P. 1156.
6. Allen, S.J. Transpiration by two poplar varieties grown as coppice for biomass production / S.J. Allen, R.L. Hall, P.T.W. Rosier // Tree physiology. – 1999. – Vol. 19, № 8. – P. 493–501.
7. Bhatnagar, P. Transgenic manipulation of the metabolism of polyamines in poplar cells / P. Bhatnagar, B.M. Glasheen, S.K. Bains, [et al.] // Plant Physiology. – 2001. – Vol. 125, № 4. – P. 2139–2153.
8. Bradshaw, H.D. Emerging Model Systems in Plant Biology: Poplar (*Populus*) as A Model Forest Tree / H.D. Bradshaw, R. Ceulemans, J. Davis, R. Stettler // Journal of Plant Growth Regulation. – 2000. – Vol. 19, № 3. – P. 306–313.
9. Broeckx, L.S. Establishment and two-year growth of a bio-energy plantation with fast-growing *Populus* trees in Flanders (Belgium): effects of genotype and former land use / L.S. Broeckx, M.S. Verlinden, R. Ceulemans // Biomass and bioenergy. – 2012. – Vol. 42, P. 151–163.
10. Dunlap, J.M. Genetic variation and productivity of *Populus trichocarpa* and its hybrids. X. Trait correlations in young black cottonwood from four river valleys in Washington / J.M. Dunlap, R.F. Stettler // Trees. – 1998. – Vol. 13, № 1. – P. 28–39.

11. Easterling, D.R. Climate extremes: observations, modeling, and impacts / D.R. Easterling, G.A. Meehl, C. Parmesan [et al.] // Science. – 2000. – Vol. 289, № 5487. – P. 2068–2074.
12. Hernandez, R.E. Bioindication and phytoremediation of cadmium and nickel contaminated environment using poplars / R.E. Hernandez, B. Krstić, S. Orlović [et al.] // Экологический вестник. – 2009. – № 3. – P. 5–11.
13. Laureysens, I. Biomass production of 17 poplar clones in a short-rotation coppice culture on a waste disposal site and its relation to soil characteristics / I. Laureysens, J. Bogaert, R. Blust, R. Ceulemans // Forest Ecology and Management. – 2004. – Vol. 187, no. 2–3. – P. 295–309.
14. Lindroth, A. Water-use efficiency of willow: variation with season, humidity and biomass allocation / A. Lindroth., T. Verwijst, S. Halldin // Journal of hydrology. – 1994. – Vol. 156, № 1–4. – P. 1–19.
15. Meiresonne, L. Measured sap flow and simulated transpiration from a poplar stand in Flanders (Belgium) / L. Meiresonne, N. Nadezhdin, J. Cermak [et al.] // Agricultural and Forest Meteorology. – 1999. – Vol. 96, № 4. – P. 165–179.
16. Minasny, B. Soil carbon 4 per mille / B. Minasny, B.P. Malone, A.B. Mcbratney [et al.] // Geoderma. – 2017. – Vol. 292. – P. 59-86.
17. Mohapatra, S. Transgenic manipulation of a single polyamine in poplar cells affects the accumulation of all amino acids / S. Mohapatra, R. Minocha, S. Long, [et al.] // Amino acids. – 2010. – Vol. 38. – P. 1117–1129.
18. Monclus, R. Productivity, water-use efficiency and tolerance to moderate water deficit correlate in 33 poplar genotypes from a *Populus deltoids* × *Populus trichocarpa* F1 progeny / R. Monclus, M. Villar, C. Barbaroux [et al.] // Tree Physiology. – 2009. – Vol. 29, № 11. – P. 1329–1339.
19. Paris, P. Comparing hybrid *Populus* clones for SRF across northern Italy after two biennial rotations: Survival, growth and yield / P. Paris, L. Mareschi, M. Sabatti, A. Pisanelli [et al.] // Biomass and bioenergy. – 2011. – Vol. 35, № 4. – P. 1524–1532.
20. Qi, H. Overexpression of the long non-coding RNA lncWOX5 negatively regulates the development of adventitious roots in *Populus* / H. Qi, L. Wu, T. Shen, S. Liu [et al.] // Industrial Crops and Products. – 2023. – Vol. 192. – P. 116054.
21. Ruixuan, L. The Influence of Plantation on Soil Carbon and Nutrients: Focusing on Tibetan Artificial Forests / L. Ruixuan, Y. Yuan, Z. Sheng // Journal of Resources and Ecology. – 2022. – Vol. 14, № 1. – P. 57–66.
22. Secchi, F. Effects of high salinity on physiological and anatomical indices during the early stages of *Populus euphratica* growth / F. Secchi, Y. Chen, M. Ayup // Fiziologiya rastenij. – 2015. – Vol. 62, № 2. – P. 249.
23. Seneviratne, S.I. Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review / S.I. Seneviratne, T. Corti, E.L. Davin [et al.] // Earth-Science Reviews. – 2010. – Vol. 99, № 3–4. – P. 125–161.
24. Stettler, R.F. Biology of *Populus* and its implications for management and conservation / R.F. Stettler. // NRC Research Press, 1996. – Vol. 40337.
25. Taylor, G. *Populus*: Arabidopsis for forestry. Do we need a model tree? / G. Taylor // Annals of Botany. – 2002. – Vol. 90, № 6. – P. 681–689.

REFERENCES

1. Evlakov P.M., Grodetskaya T.A., Boltnev I.A. Assessment of the carbon sequestration capacity of fast-growing poplars. *State and prospects for the development of the agro-industrial complex: collection of scientific papers of the XVI International Scientific and Practical Conference in within the framework of the XXVI Agro-Industrial Forum of the South of Russia and the exhibition "Interagromash" and "Agrotechnologies", Rostov-on-Don, March 01–03, Don State Technical University. Rostov-on-Don [Sostoyanie i perspektivy` razvitiya agropromy`shlennogo kompleksa. Sbornik nauchny`x trudov XVI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii v ramkax XXVI Agropromy`shlennogo foruma yuga Rossii i vy`stavki «Interagromash» i «Agrotexnologii», Rostov-na-Donu, 01–03 marta 2023 goda. Donskoj gosudarstvenny`j texnicheskij universitet. Rostov-na-Donu]*, 2023, pp. 116–117. DOI: 10.23947/interagro.2023.116-117. (In Russian).
2. Evlakov P.M., Zhuzhukin K.V., Grodetskaya T.A., Konstantinov A.V. Quantitative estimates of the daily dynamics of carbon sequestration by juvenile birch, poplar and scots pine plants. *Proceedings of the St. Petersburg Scientific Research Institute of Forestry [Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva]*, 2024, no. 2, pp. 17–28. DOI 10.21178/2079-6080.2024.2.17. EDN CEFQDA. (In Russian).
3. Kogut B.M., Semenov V.M., Artemyeva Z.S., Danchenko N.N. Dehumidification and soil sequestration of carbon. *Agrochemistry [Agroximiya]*, 2021, no. 5, pp. 3–13. (In Russian).
4. Solomenceva A.S. The state of woody plants at protective afforestation and landscaping sites in the Kalachevsky district of the Volgograd region. *News of universities. Forest magazine [Izv. vuzov. Lesn. zhurn]*, 2022, no. 5, pp. 58–72. (In Russian).

5. Alaejos J., Tapias R., López F., Romero D., Ruiz F., Fernández M. Biomass Production and Quality of Twelve Fast-Growing Tree Taxa in Short Rotation under Mediterranean Climate. *Forests*, 2023, vol. 14, no. 6, pp. 1156.
6. Allen S.J., Hall R.L., Rosier P.T.W. Transpiration by two poplar varieties grown as coppice for biomass production. *Tree physiology*, 1999, vol. 19, no. 8, pp. 493–501.
7. Bhatnagar P., Glasheen B.M., Bains S.K., Long S.L., Minocha R., Walter C., Minocha S.C. Transgenic manipulation of the metabolism of polyamines in poplar cells. *Plant Physiology*, 2001, vol. 125, no. 4, pp. 2139–2153.
8. Bradshaw H.D., Ceulemans R., Davis J., Stettler R. Emerging Model Systems in Plant Biology: Poplar (*Populus*) as A Model Forest Tree. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2000, vol. 19, no. 3, pp. 306–313.
9. Broeckx, L.S., Verlinden M.S., Ceulemans R. Establishment and two-year growth of a bio-energy plantation with fast-growing *Populu*s trees in Flanders (Belgium): effects of genotype and former land use. *Biomass and bioenergy*, 2012, vol. 42, pp. 151–163.
10. Dunlap J.M., Stettler R.F. Genetic variation and productivity of *Populus trichocarpa* and its hybrids. X. Trait correlations in young black cottonwood from four river valleys in Washington. *Trees*, 1998, vol. 13, no. 1, pp. 28–39.
11. Easterling D. R., Meehl G. A., Parmesan C., Changnon S.A., Karl T.R., Mearns L.O. Climate extremes: observations, modeling, and impacts. *Science*, 2000, vol. 289, no. 5487, pp. 2068–2074.
12. Nikolić N., Krstić B., Orlović S., Pajević S., Borišev M., Pilipović A. Bioindication and phytoremediation of cadmium and nickel contaminated environment using poplars. *Environmental newsletter*, 2009, no. 3, pp. 5–11.
13. Laureysens I., Bogaert J., Blust R., Ceulemans R. Biomass production of 17 poplar clones in a short-rotation coppice culture on a waste disposal site and its relation to soil characteristics. *Forest Ecology and Management*, 2004, vol. 187, no. 2–3, pp. 295–309.
14. Lindroth A., Verwijst T., Halldin S. Water-use efficiency of willow: variation with season, humidity and biomass allocation. *Journal of hydrology,* 1994, vol. 156, no. 1–4, pp. 1–19.
15. Meiresonne L., Nadezhdin N., Cermak J., Van Slycken J., Ceulemans R. Measured sap flow and simulated transpiration from a poplar stand in Flanders (Belgium). *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, vol. 96, no. 4, pp. 165–179.
16. Minasny B., Malone, B. P., McBratney, A. B., Angers, D. A., Arrouays, D., Chambers, A. Soil carbon 4 per. *Geoderma*, 2017, vol. 292, pp. 59–86.
17. Mohapatra S., Minocha R., Long S., Minocha S.C. Transgenic manipulation of a single polyamine in poplar cells affects the accumulation of all amino acids. *Amino acids*, 2010, vol. 38, pp. 1117–1129.
18. Monclus R., Villar M., Barbaroux C., Bastien C., Fichot R., Delmotte F.M., Brignolas F. Productivity, water-use efficiency and tolerance to moderate water deficit correlate in 33 poplar genotypes from a *Populus deltoids* × *Populus trichocarpa* F1 progeny. *Tree Physiology*, 2009, vol. 29, no. 11, pp. 1329–1339.
19. Paris P., Mareschi L., Sabatti M., Pisanelli A., Ecosse A., Nardin F., Scarascia-Mugnozza G. Comparing hybrid *Populus* clones for SRF across northern Italy after two biennial rotations: Survival, growth and yield. *Biomass and bioenergy*, 2011, vol. 35, no. 4, pp. 1524–1532.
20. Qi H., Wu L., Shen T., Liu S., Cai H., Ran N., Xu M. Overexpression of the long non-coding RNA lncWOX5 negatively regulates the development of adventitious roots in *Populus*. *Industrial Crops and Products*, 2023, vol. 192, p. 116054.
21. Ruixuan L. Yuan Y., Sheng Z. The Influence of Plantation on Soil Carbon and Nutrients: Focusing on Tibetan Artificial Forests. *Journal of Resources and Ecology*, 2022, vol. 14, no. 1, pp. 57–66.
22. Secchi F. Chen Y., Ayup M. Effects of high salinity on physiological and anatomical indices during the early stages of *Populus euphratica* growth. *Fiziologiya rastenij*, 2015, vol. 62, no. 2, p. 249. DOI: 10.7868/S0015330315020177
23. Seneviratne S.I., Corti T., Davin E.L., Hirschi M., Jaeger E.B., Lehner I., Teuling A.J. Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*, 2010, vol. 99, no. 3–4, pp. 125–161.
24. Stettler R.F. Biology of *Populus* and its implications for management and conservation. *NRC Research Press*, 1996, vol. 40337.
25. Taylor G. *Populus*: Arabidopsis for forestry. Do we need a model tree? *Annals of Botany,* 2002, vol. 90, no. 6, pp. 681–689.

Статья поступила в редакцию 13.08.2024