

Научная статья

УДК 634.948.471

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-6-71-81

Корневая система тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.)

О.Н. Тюкавина[✉], д-р с.-х. наук, доц.; Researcher ID: [H-2336-2019](https://orcid.org/0000-0003-4024-6833),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4024-6833>

Л.Ф. Попова, д-р биол. наук, проф.; ResearcherID: [W-4158-2018](https://orcid.org/0000-0003-1650-6797),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1650-6797>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; o.tukavina@narfu.ru[✉], lf.popova@narfu.ru

Поступила в редакцию 19.01.21 / Одобрена после рецензирования 23.04.21 / Принята к печати 26.04.21

Аннотация. Цель исследования – изучение особенностей корневой системы тополя бальзамического в условиях г. Архангельска. Актуальность темы определяется многофункциональностью тополя в условиях города. Эффективность санитарующих функций, фиторемидации, депонирования углерода, устойчивость тополей обусловлены состоянием их корневой системы. Выявление особенностей ее строения позволит подбирать и создавать условия, необходимые для успешного произрастания деревьев этого вида. Исследования структуры корневой системы, учет количества, диаметра и разветвленности корней разных порядков проводили по выкорчеванным деревьям, произрастающим одиночно и в группах. В скверах при помощи прибора «Арботом» с модулем «Арборадикс» оценивали протяженность скелетных корней тополя с их последующей поверхностной раскопкой. Устойчивость тополей к ветровалу обеспечивается мощным фундаментом в центральной части корневой системы, формирующимся из разросшейся сердцевины, досковидных оснований проксимальных корней и обрастающих корней. Изгибание корней первых порядков на раннем этапе развития дерева создает удерживающую платформу для черенка. Сближенное групповое произрастание тополей приводит к «этажированию» и углублению корневой системы. При групповом произрастании тополей формируется большее количество проксимальных корней, но с меньшим диаметром по сравнению с корнями солитеров. Так, средний диаметр основания корней первого порядка при групповом произрастании составляет 11,5 см, при одиночном – 24,5 см. Протяженность скелетных корней тополей в скверах – от 2 до 9 м. Сокращение доли тополей в насаждении в 2,3 раза в сочетании со снижением густоты древостоя в 2 раза или площади дорожек в 2 раза приводит к увеличению протяженности скелетных корней в 1,5–2 раза, формированию более равномерной корневой системы. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании зеленых насаждений в городе.

Ключевые слова: тополь бальзамический, устойчивость тополя, городские насаждения, корневая система, структура корневой системы, скелетные корни, проксимальные корни, обрастающие корни, «Арборадикс», Архангельск

Для цитирования: Тюкавина О.Н., Попова Л.Ф. Корневая система тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 6. С. 71–81. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-71-81>

Original article

Root System of Balsam Poplar (*Populus balsamifera* L.)

Olga N. Tyukavina[✉], Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [H-2336-2019](https://orcid.org/0000-0003-4024-6833),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4024-6833>

Ludmila F. Popova, Doctor of Biology, Prof.; ResearcherID: [W-4158-2018](https://orcid.org/0000-0003-1650-6797),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1650-6797>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; o.tukavina@narfu.ru[✉], lf.popova@narfu.ru

Received on January 19, 2021 / Approved after reviewing on April 23, 2021 / Accepted on April 26, 2021

Abstract. The research aims at studying the features of the balsam poplar root system in the conditions of Arkhangelsk. The relevance of the topic is determined by the poplar multifunctionality in urban conditions. The effectiveness of sanitation functions, phytoremediation, carbon sequestration, and sustainability of poplars is determined by their root system condition. Understanding the specifics of its structure will enable the selection and creation of conditions necessary for the successful growth of trees of this species. Studies of the root system structure, recording the number, diameter, and branching of roots of different orders were carried out on uprooted trees growing isolated as well as in groups. In public gardens, the length of poplar skeletal roots with their subsequent surface excavation was assessed using the Arbotom device with the Arboradix module. A strong foundation in the central part of the root system, formed of the overgrown core, buttress roots of the first order and fibrous roots, provides resistance of poplars to windthrow. The bending of first-order roots early in tree development creates a holding platform for the branch cuttings. The close group growth of poplars leads to “storeying” and deepening of the root system. Poplars growing in groups form a greater number of proximal roots with a smaller diameter compared to isolated growth. Thus, the average diameter of the base of the first-order roots in group growth is 11.5 cm; in single growth – 24.5 cm. The length of poplar skeletal roots in public gardens ranges from 2 to 9 m. Reducing the share of poplars in the plantation by 2.3 times together with a decrease in stand density by 2 times or track area by 2 times leads to an increase in the length of skeletal roots by 1.5–2 times and the formation of a more uniform root system. The results can be used in the design of urban green spaces.

Keywords: balsam poplar, poplar stability, urban plantations, root system, root system structure, skeletal roots, proximal roots, fibrous roots, Arboradix, Arkhangelsk

For citation: Tyukavina O.N., Popova L.F. Root System of Balsam Poplar (*Populus balsamifera* L.). *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 6, pp. 71–81. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-71-81>

Введение

Тополь – перспективная древесная порода. Для озеленения в условиях Севера России наиболее предпочтителен тополь бальзамический [5], так как он характеризуется наивысшими по сравнению с другими древесными видами адаптивной способностью (комплексная оценка по акклиматизационному



числу [1]), газоустойчивостью, морозоустойчивостью, холодостойкостью, относительной устойчивостью к болезням и токсикантам [2]. Изучение роста и продуктивности тополей в основном было связано с получением древесины для производства целлюлозы, биотоплива [25, 27]. Однако тополя используются и в создании защитных, буферных зон [16, 23, 24, 26, 29, 32]. Проблемы потепления климата и повышенного содержания парниковых газов в атмосфере стимулируют исследование тополей как потенциальных поглотителей углерода из-за быстрого накопления этими деревьями биомассы над и под землей [9, 14, 18]. Несмотря на сохранение интереса исследователей к корневым системам тополей [7, 8, 10, 15, 20], их морфология и биология недостаточно изучены, особенно в посадках черенками. Учет особенностей строения корневой системы тополей при ландшафтном строительстве, озеленении городов и создании плантаций обеспечит эффективное выполнение тополями saniрующих функций, депонирование углерода и устойчивость к ветровым нагрузкам.

Цель исследования – изучение особенностей корневой системы тополей бальзамических в условиях г. Архангельска.

Объекты и методы исследования

Исследование структуры корневой системы тополя бальзамического проводили по 10 деревьям, выкорчеванным вдоль Троицкого и Ленинградского проспектов: 5 деревьев произрастали в групповых посадках, 5 – одиночно. Диаметр деревьев – от 57 до 62 см; возраст – от 50 до 60 лет; расстояние между деревьями (измеряли от центра дерева) в групповых посадках – менее 1 м. У корневой системы в 10-кратной повторности фиксировали диаметры корней разных порядков у основания и на расстоянии от него. Определяли количество ответвлений на корнях разных порядков и диаметров. Рассчитывали интенсивность разветвленности корней как количество ответвлений на единицу протяженности корня. Производили раскопку оставшихся в почве корней в радиусе до 4 м. Определяли глубину залегания корней.

Протяженность корней тополя оценивали у 15 растущих деревьев на следующих объектах. Сквер у Молодежного театра: занимает 1355 м²; дорожки составляют 11 % от его площади; густота насаждения – 857 шт./га; средняя высота, диаметр и возраст тополей – 25,9 м, 42,1 см и 45 лет соответственно; почва – культурозем; полевая влажность – 40 %. Сквер у Драмтеатра: 15 762 м²; дорожки – 10 %; густота насаждения – 277 шт./га; средняя высота, диаметр и возраст тополей – 30,2 м, 55,6 см и 40 лет соответственно; почва – культурозем; полевая влажность – 38 %. Сквер у Лесозавода № 3: 3916 м²; дорожки – 5 %; густота насаждения – 390 шт./га; средняя высота, диаметр и возраст тополей – 30,1 м, 45,9 см и 42 года соответственно; почва – дерновая; полевая влажность – 45 %.

Полевую влажность определяли весовым методом на глубине 10 см. Для оценки протяженности корневой системы использовали прибор «Арботом» с модулем «Арборадикс». Сенсоры «Арботома» закрепляли на стволе на высоте 1,3 м с расстоянием по окружности 10 см. Модуль «Арборадикс» представляет собой стальную штангу с сенсором, присоединенным кабелем к другому сенсору, установленному на стволе дерева. С помощью резинового молотка и стальной штанги механические импульсы последовательно через каждый метр от соответствующих сенсоров «Арботома» направлялись в почву в 4 стороны (север, юг, запад, восток).

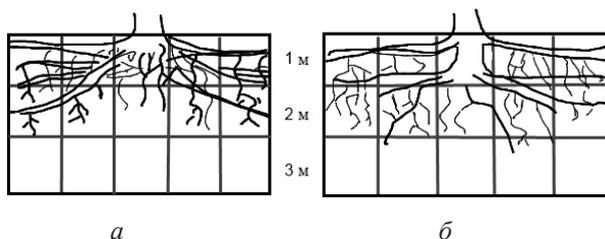
Исходили из гипотезы, что если звуковой импульс не доходит до сенсора на дереве, то в почве под штангой его корни отсутствуют. Наименьший диаметр корня, при котором он способен улавливать звуковой импульс, посылаемый штангой «Арборадикса», находится в диапазоне от 1,4 до 2,1 см. В сходных почвенных условиях (культуроземы) вблизи театров различие в данных о диаметрах корней незначимо. Следовательно, «Арборадикс» в комплексе с «Арботомом» позволяет выявить распространение скелетных корней диаметром от 1,4 см.

Последняя точка измерения по конкретному направлению определялась наличием звукового сигнала. Точки, с которых направляли импульсы в почву, записывались и графически изображались в линейной диаграмме программы Arboradix™ в виде луча, соответствующего протяженности корня, с возможностью определения его длины. Если корень изначально не обнаруживался, проводили исследование по дополнительному румбу. После оценки протяженности корней обозначали в натуре периметр корней и направления исследования. В завершающей точке изучения конкретного направления раскапывали корень, при его отсутствии смещали раскопку в сторону – образовывалась траншея. При обнаружении корня определяли средний диаметр в вертикальном и горизонтальном направлениях и проводили поверхностную раскопку для проверки принадлежности корня к данному дереву. Для каждого дерева рассчитывали среднюю протяженность корней по 4 направлениям, находили максимальную разницу в протяженности корней. Исследования осуществляли в июле в сухую погоду.

При обработке данных использовали программу Statistica 6.0.

Результаты исследования и их обсуждение

Посадки тополя в г. Архангельске осуществлялись черенками. Подземная часть черенка исполняет роль главного корня, от которого отходят горизонтальные корни. Таким образом, корневая система представлена придаточными корнями. Корни образуются по всей длине подземной оси дерева (см. рисунок). Подземная ось заканчивается площадкой. При повреждении ствола тополя каллус образуется быстро и в большом количестве [4], придаточные корни формируются недалеко от поверхности среза над каллусом. Так называемые раневые случайные корни начинаются от каллуса на нижней поверхности среза, но они недолговечны [28].



Корневая система тополя: *a* – солитер; *b* – дерево в групповой посадке (размер ячейки сетки – 1×1 м)

Poplar root system: *a* – single tree; *b* – tree in a group planting (grid cell size 1×1 m)

От подземной оси дерева отходят 4–6 корней первого порядка, называемых проксимальными [15], с ясно выраженными толстыми (до 8–19 см в ширину и 13–35 см в высоту) дисковидными основаниями. Такие корни придают дереву большую устойчивость [3]. Причем их наивысшая прочность отмечается в нижней части корневой системы [34]. Эти корни занимают поверхностные слои почвы в радиусе 3–4 м вокруг дерева. При одиночном произрастании у тополя формируется мощный фундамент, утолщенная часть подземного ствола с основаниями придаточных корней первого порядка дисковидной формы. Диаметр такой сердцевины корневой системы в 2 раза больше диаметра ствола. Формирование сердцевины корневой системы происходит за счет обрастания с увеличением возраста дерева первичных косо-вертикальных корней древесной массой, что приводит к образованию мощного фундамента. Сердцевина корневой системы и корни первого порядка формируют «якорь», удерживающий дерево в почве.

У ряда корней первого и второго порядков при уменьшении их диаметра происходит изгибание. Прочностные характеристики корня наивысшие в точках максимального изгибания корня [34]. Изгибание корней первых порядков обусловлено формированием удерживающей платформы для черенка.

На расстоянии 3–4 м от ствола скелетные корни приобретают форму цилиндров с диаметром от 3 до 5 см. Все корни обильно ветвятся. Корни второго и последующих порядков могут быть горизонтальными и косо-вертикальными. На крупных скелетных корнях развиваются обрастающие корни, которые формируются как в горизонтальных, так и в вертикальных направлениях по всей протяженности скелетных корней первого и второго порядков. Обрастающие корни в основании представлены разным диаметром – от 1 до 5 мм и более, следовательно, они возникают на одном и том же участке корня в разные возрастные периоды.

Обрастающие корни могут быть 2 видов: в форме цилиндров и в форме конусов. Конусообразные корни (якорные) отходят от нижней поверхности придаточных корней первого порядка и имеют многочисленные ответвления. Они направлены вниз и достигают глубины 50–60 см. Такие корни закрепляют придаточные корни первого порядка и способствуют большей устойчивости дерева [3]. А. Stokes, С. Mattheck [34] указывают, что интенсивное ветвление сердцевины и дисковидных корней первого порядка позволяет повысить устойчивость дерева независимо от длины скелетных корней. Деревья постоянно модифицируют свою корневую систему в попытке адаптироваться и лучше использовать среду укоренения [11].

При длительном подтоплении корневой системы тополя в период активного роста отмечается гибель якорных обрастающих корней, что приводит к вывалу деревьев при штормовых порывах ветра. Например, в Маймаксанском округе с восточной стороны дороги по улице Победы на некоторых участках в мае–начале июня отмечаются подпор грунтовых вод в связи с нарушением естественного стока и, как результат, вывал деревьев тополя в сторону от дороги. Интересен тот факт, что корневая система дерева доходит до оптимальных условий и дерево, несмотря на вертикальное положение корневой лапы, продолжает вегетировать.

При групповом произрастании для тополей характерно «этажирование» корневой системы. Согласно Г.И. Редько [6], этажирование – результат приспособления корневой системы к почвенным условиям. Выделяется 2 центра ветвления подземного ствола: верхний «этаж» скелетных корней располагается

в поверхностном слое почвы на глубине до 35–40 см, нижний – на глубине 70–105 см. В первом ярусе корневой системы отмечается практически в 1,5 раза меньше корней первого порядка по сравнению со вторым ярусом, что приводит к формированию большей массы корней второго этажа (табл. 1). Получается, основная масса тонких корней располагается глубже 1 м, в то время как при одиночном произрастании – до 1 м.

Таблица 1

Характеристики корневой системы тополя бальзамического при различных условиях произрастания
Characteristics of the balsam poplar root system in various growing conditions

Показатель	Условия произрастания		
	Одиночное	Групповое	
	1	1	2
Количество корней первого порядка, шт.	6	4	6
Интенсивность разветвленности корней, шт./м:			
первого порядка	4±0,3	2±0,7	3±0,6
второго порядка	8±0,4	7±0,8	8±0,5
третьего порядка	15±0,6	14±0,8	16±0,7
Интенсивность разветвленности корней, шт./см:			
диаметром 5 мм	1,1±0,2	1,0±0,3	2,0±0,5
диаметром 1 мм	1,1±0,3	1,0±0,4	1,3±0,3
диаметром 0,1 мм	15,0±3,0	12,0±4,0	10,0±3,0
Диаметр основания корней, см*:			
первого порядка	31,5±1,6	14,5±0,7	13,8±0,5
	17,5±0,7	9,0±0,4	9,0±0,6
второго порядка	12,6±0,4	12,3±0,4	12,1±0,2
	10,5±0,3	9,5±0,3	10,0±0,4
третьего порядка	2,9±0,2	2,5±0,3	2,7±0,2
	2,9±0,4	2,5±0,4	2,7±0,3
Диаметр корней первого порядка на расстоянии 3 м от дерева, см:			
по высоте	6,0±0,4	4,0±0,2	4,3±0,2
по ширине	5,0±0,5	3,0±0,4	3,1±0,3

*В верхней строке представлены значения по высоте, в нижней – по ширине.

При близком расположении деревьев друг от друга (расстояние между центрами – около 50–60 см) в направлении соседнего дерева корень первого порядка не развивается в верхнем этаже корневой системы, что приводит к неравномерному распределению проксимальных корней вокруг ствола. Это подтверждает чувствительность тополя к внутри- и межвидовой конкуренции корней [12, 30, 31]. Такая стратегия распределения корней называется «избегание конкуренции» [31]. В результате корневой конкуренции происходит углубление корневой системы. На уменьшение количества корней и более глубокое их распределение в почвенном профиле при наличии барьеров также указывали L.R. Costello, C.L. Elmore, S. Steinmaus [13].

Вертикальный диаметр основания корней первого порядка при близком произрастании 2 деревьев тополя в первом и втором ярусе корневой системы составляет в среднем 15 см, что в 2 раза меньше по сравнению с диаметрами одиночно произрастающих деревьев. Соглас-

но М. Lухová [28], радиальный рост придаточных корней ограничен и есть значительные различия в радиальных приростах отдельных корней. Меньшая толщина корней в верхнем ярусе корневой системы обусловлена корневой конкуренцией между соседними деревьями. Согласно Р. Hajek, D. Hertel, С. Leuschner [22], у тополя в результате внутри- и межвидовой конкуренции формируются более тонкие и длинные корни первого и второго порядков, но влияние этого фактора на морфологию мелких корней незначительно. В нашем примере диаметры корней третьего порядка при групповом и одиночном произрастании также значимо не различались. Более тонкие корни первого порядка во втором ярусе корневой системы при групповом произрастании тополя образуются в результате менее благоприятных свойств почвы на данной глубине. Так, в городских ландшафтах наиболее хорошие условия по обеспеченности воздухом и минеральными ресурсами складываются вблизи поверхности почвы [13], что обуславливает размещение здесь корневых систем древесных растений [17, 19, 21]. Меньшее количество доступной влаги, питательных веществ и кислорода приводит к снижению роста корневой системы тополя [33].

Диаметр основания проксимальных корней положительно связан с общей биомассой и длиной корня [15]. В результате меньшее количество проксимальных корней при одиночном произрастании уравнивается их большим диаметром по сравнению с групповым, что обеспечивает равенство общей биомассы корней в обоих случаях.

Скелетные корни, удаленные от сердцевины корневой системы, более прочные по сравнению с досковидными корнями в основании [34]. Поэтому наибольшая протяженность скелетных корней первых порядков обеспечит и наибольшую устойчивость дерева к воздействию ветра.

Согласно показаниям прибора «Арботом» с модулем «Арборадикс», протяженность корней растущих тополей в сквере у Драмтеатра составила от 2 до 6 м, в сквере у Молодежного театра – от 1 до 5 м, в сквере вблизи Лесозавода № 3 – от 4 до 9 м. В среднем протяженность корней в сквере вблизи Лесозавода № 3 превышает данный показатель в скверах вблизи театров в 2 раза (табл. 2), что обусловлено меньшими площадью дорожек, густотой насаждения и процентным соотношением древесных пород в нем. В скверах вблизи театров доминируют тополя (76 и 81 % соответственно), а в удаленном от центра города сквере – береза. Тополя здесь составляют 34 %. Большой процент дорожек приводит к уплотнению почвы, а однородные в видовом составе насаждения – к внутривидовой конкуренции, что ограничивает распространение корней в поверхностных слоях почвы. Протяженность скелетных корней тополей в скверах театра Драмы и Молодежного театра значимо не различается, несмотря на различие в густоте насаждения в 3 раза. Меньшая густота первого насаждения компенсируется большей плотностью дорожек по сравнению со вторым. В результате сокращения доли тополей в насаждении в 2,3 раза в сочетании со снижением густоты древостоя в 2 раза или площади дорожек в 2 раза протяженность скелетных корней увеличилась в 1,5–2 раза.

Влияние на протяженность корней может оказывать и почва, которая в сквере у Лесозавода № 3 более бедная по сравнению с культуросемами центральных скверов, дополнительно периодически отсыпаемых привозной почвой с полей и огородов. Однако данный фактор в основном воздействует на локацию концентрации тонких корней относительно ствола и определяет зону питания дерева, в то время как скелетные корни выполняют функцию его фундамента.

Таблица 2

**Характеристики корневой системы тополя бальзамического
на объектах исследования**

Characteristics of the balsam poplar root system

Показатели статистического анализа	Средняя протяженность корней дерева, м	Наибольшее различие в протяженности корней дерева, м	Минимальный диаметр корня, способный улавливать звуковой импульс, см
<i>Сквер у Драмтеатра</i>			
$M \pm m_M$	3,7±0,3	1,9±0,4	1,8±0,1
δ	1,37	1,51	0,40
C	37,0	79,4	22,2
t_1	10,6	4,8	18,0
p	9,5	20,5	5,6
<i>Сквер у Молодежного театра</i>			
$M \pm m_M$	3,2±0,2	1,8±0,2	1,9±0,1
δ	1,01	0,90	0,30
C	31,5	50,0	15,8
t_1	16,0	9,0	23,7
p	6,3	11,1	4,2
<i>Сквер у Лесозавода № 3</i>			
$M \pm m_M$	6,7±0,5	1,3±0,2	1,6±0,1
δ	1,86	0,82	0,23
C	27,8	63,0	14,3
t_1	13,4	6,5	32,0
p	7,4	15,3	3,1

Примечание: M – среднее значение; m_M – основная ошибка среднего значения; δ – среднее квадратичное отклонение; C – коэффициент изменчивости; t_1 – достоверность среднего значения; p – точность опыта.

Различие протяженности скелетных корней у конкретного дерева в сквере Драмтеатра составляло 4 м у 13 % деревьев, 3 м – у 33 %; в сквере Молодежного театра – 3 м у 23 % деревьев. В сквере вблизи Лесозавода № 3 максимальное различие протяженности корней дерева – 2 м. Следовательно, при меньших густоте насаждения, плотности дорожек и при смешанном составе деревьев в насаждении у тополя формируется более равномерная, уравновешенная по длине корневая система.

Заключение

Результаты исследований показали, что корневая система тополя бальзамического, выращенного из черенков, представляет собой систему придаточных корней. Устойчивость к ветровалу достигается за счет сформированной подземной осью дерева мощной сердцевины корневой системы, досковидных оснований корней первого порядка и развития на них обрастающих корней. При сближенном групповом произрастании тополей формируется 2-ярусная корневая система с большим количеством проксимальных корней, что обеспечивает значительную поглощающую поверхность, но меньший их

диаметр по сравнению с корнями солитеров и, следовательно, меньшую ветроустойчивость. При близком произрастании тополей сокращается количество скелетных корней первого порядка с выпадением их в направлении соседнего дерева. Ветроустойчивость тополя обуславливается также протяженностью скелетных корней. Протяженность скелетных корней с диаметром более 1,4 см составляет от 2 до 9 м. При небольших густоте насаждения, плотности дорожек в сквере и смешанном составе насаждения формируются скелетные корни первого порядка, равномерно распределенные вокруг ствола и имеющие большую протяженность.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании экологического каркаса города, в котором «ячейки природы» следует формировать из тополя бальзамического с примесью других древесных видов, избегая их близкого расположения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Залывская О.С. Комплексная оценка адаптивной способности интродуцентов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2014. № 6. С. 161–166. URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/ea7/2-_-kompleksnaya-otsenka-adaptivnoy-sposobnosti-introdutsentov.pdf
2. Zalyvskaya O.S. Comprehensive Evaluation of Adaptive Capacity of Introduced Species. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2014, no. 6, pp. 161–165. (In Russ.).
3. Исаева Е.В. Комплексная переработка вегетативной части тополя бальзамического с получением биологически активных продуктов: дис. ... д-ра техн. наук. Красноярск, 2008. 381 с.
4. Isaeva E.V. *Complex Processing of the Balsam Poplar Vegetative Part of with Obtaining Biologically Active Products*: Dr. Eng. Sci. Diss. Krasnoyarsk, 2008. 381 p. (In Russ.).
5. Коцеев А.Л. Заболачивание и разболачивание вырубок // Тр. Ин-та леса АН СССР. М., 1954. С. 134–140.
6. Koshcheev A.L. Waterlogging and Reclamation of Clearcuts. *Proceedings of the Forest Institute of the USSR Academy of Sciences*. Moscow, 1954, pp. 134–140. (In Russ.).
7. Крамер П.Д., Козловский Т.Т. Физиология древесных растений. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 462 с.
8. Kramer P.D., Kozlovskiy T.T. *Physiology of Woody Plants*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 462 p. (In Russ.).
9. Орлов Ф.Б. Озеленение городов и поселков Архангельской области. Архангельск: Арханг. обл. гос. изд-во, 1951. 26 с.
10. Orlov F.B. *Greening of Cities and Towns of the Arkhangelsk Region*. Arkhangelsk, Arkhangel'skoye oblastnoye gosudarstvennoye izdatel'stvo, 1951. 26 p. (In Russ.).
11. Редько Г.И. Биология и культура тополей. Л.: ЛГУ, 1975. 174 с.
12. Red'ko G.I. *Biology and Trial of Poplars*. Leningrad, LGU Publ., 1975. 174 p. (In Russ.).
13. Adonsou K.E., DesRochers A., Tremblay F., Thomas B.R., Isabel N. The Clonal Root System of Balsam Poplar in Upland Sites of Quebec and Alberta. *Ecology and Evolution*, 2016, vol. 6, iss. 19, pp. 6846–6854. <https://doi.org/10.1002/ece3.2441>
14. Bilodeau-Gauthier S., Paré D., Messier C., Bélanger N. Root Production of Hybrid Poplars and Nitrogen Mineralization Improve Following Mounding of Boreal Podzols. *Canadian Journal of Forest Research*, 2013, vol. 43, no. 12, pp. 1092–1103. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2013-0338>
15. Block R.M.A. *Fine Root Dynamics and Carbon Sequestration in Juvenile Hybrid Poplar Plantations in Saskatchewan, Canada*. M.Sc. Thesis. Saskatoon, University of Saskatchewan, 2004.

10. Chen Z.-X., Ni H.-G., Jing X., Chang W.-J., Sun J.-L., Zeng H. Plant Uptake, Translocation, and Return of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons via Fine Root Branch Orders in a Subtropical Forest Ecosystem. *Chemosphere*, 2015, vol. 131, pp. 192–200. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.03.045>
11. Chiatante D., Beltotto M., Onelli E., Di Iorio A., Montagnoli A., Scippa S.G. New Branch Roots Produced by Vascular Cambium Derivatives in Woody Parental Roots of *Populus nigra* L. *Plant Biosystems*, 2010, vol. 144, iss. 2, pp. 420–433. <https://doi.org/10.1080/11263501003718612>
12. Coll L., Messier C., Delagrange S., Berninger F. Growth, Allocation and Leaf Gas Exchanges of Hybrid Poplar Plants in Their Establishment Phase on Previously Forested Sites: Effect of Different Vegetation Management Techniques. *Annals of Forest Science*, 2007, vol. 64, pp. 275–285. <https://doi.org/10.1051/forest:2007005>
13. Costello L.R., Elmore C.L., Stelnmaus S. Tree Root Response to Circling Root Barriers. *Journal of Arboriculture*, 1997, vol. 23(6), pp. 211–218. <https://doi.org/10.48044/jauf.1997.033>
14. Dewar R.C., Cannell M.G.R. Carbon Sequestration in the Trees, Products and Soils of Forest Plantations: An Analysis Using UK Examples. *Tree Physiology*, 1992, vol. 11, iss. 1, pp. 49–71. <https://doi.org/10.1093/treephys/11.1.49>
15. Domenicano S., Coll L., Messier C., Berninger F. Nitrogen Forms Affect Root Structure and Water Uptake in the Hybrid Poplar. *New Forests*, 2011, vol. 42, pp. 347–362. <https://doi.org/10.1007/s11056-011-9256-x>
16. Douglas G.B., McIvor I.R., Potter J.F., Foote L.G. Root Distribution of Poplar at Varying Densities on Pastoral Hill Country. *Plant and Soil*, 2010, vol. 333, pp. 147–161. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0331-4>
17. Eavis B.W., Payne D. Soil Physical Conditions and Root Growth. *Root Growth*. Ed. by W.J. Whittington. London, Butterworths, 1968, pp. 256–269.
18. Eissenstat D.M., Wells C.E., Yanai R.D., Whitbeck J.L. Building Roots in a Changing Environment: Implications for Root Longevity. *New Phytologist*, 2000, vol. 147, iss. 1, pp. 33–42. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00686.x>
19. Fernandez T.R., Perry R.L., Ferree D.C. Root Distribution Patterns of Nine Apple Rootstocks in Two Contrasting Soil Types. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1995, vol. 120, iss. 1, pp. 6–13. <https://doi.org/10.21273/JASHS.120.1.6>
20. Gaspard D.T., DesRochers A. Natural Root Grafting in Hybrid Poplar Clones. *Trees*, 2020, vol. 34, iss. 4, pp. 881–890. <https://doi.org/10.1007/s00468-020-01966-z>
21. Graecen E.L., Barley K.P., Farrell D.A. The Mechanics of Root Growth in Soil with Particular Reference to the Implications for Root Distribution. *Root Growth*. London, Butterworths, 1969, pp. 256–268.
22. Hajek P., Hertel D., Leuschner C. Root Order- and Root Age-Dependent Response of Two Poplar Species to Belowground Competition. *Plant and Soil*, 2014, vol. 377, iss. 1-2, pp. 337–355. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-2007-3>
23. Husak A.L., Grado S.C. Monetary Benefits in a Southern Silvopastoral System. *Southern Journal of Applied Forestry*, 2002, vol. 26, iss. 3, pp. 159–164. <https://doi.org/10.1093/sjaf/26.3.159>
24. Jordahl J.L., Foster L., Schnoor J.L., Alvarez P.J.J. Effect of Hybrid Poplar Trees on Microbial Populations Important to Hazardous Waste Bioremediation. *Environmental Toxicology* 1997, vol. 16, iss. 6, pp. 1318–1321. <https://doi.org/10.1002/etc.5620160630>
25. Klasnja B., Kopitovic S., Orlovic S. Wood and Bark of Some Poplar and Willow Clones as Fuelwood. *Biomass and Bioenergy*, 2002, vol. 23, iss. 6, pp. 427–432. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00069-7](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00069-7)
26. Lewis A.C., Baird D.R., Burton S.J. Phytoremediation Technology at the DOE Portsmouth Gaseous Diffusion Plant. *Proceedings – 10th International Conference on*

Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICM'05. Glasgow, Scotland, 2005, vol. 2005, pp. 433–438.

27. Li H., Hu J.-J. Seasonal and Annual Dynamics of the Gross Caloric Value of Eleven Poplar and Willow Clones. *Forest Research*, 2010, vol. 23, iss. 3, pp. 425–429. (In Chinese).

28. Luxová M. The Integration of Growth Activity in Vegetatively Propagated Poplar during the Establishment Year. *Biologia Plantarum*, 1984, vol. 26, iss. 6, pp. 433–440. <https://doi.org/10.1007/BF02909593>

29. Ma X., Richter A.R., Albers S., Burken J.G. Phytoremediation of MTBE with Hybrid Poplar Trees. *International Journal of Phytoremediation*, 2004, vol. 6, iss. 2, pp. 157–167. <https://doi.org/10.1080/16226510490454821>

30. Messier C., Coll L., Poitras-Larivière A., Bélanger N., Brisson J. Resource and Non-Resource Root Competition Effects of Grasses on Early- versus Late-Successional Trees. *Journal of Ecology*, 2009, vol. 97, iss. 3, pp. 548–554. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2009.01500.x>

31. Novoplansky A. Picking Battles Wisely: Plant Behaviour under Competition. *Plant, Cell & Environment*, 2009, vol. 32, iss. 6, pp. 726–741. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.01979.x>

32. Schnoor J.L., Licht L.A., McCutcheon S.C., Wolfe N.L., Carreira L.H. Phytoremediation of Organic and Nutrient Contaminants. *Environmental Science and Technology*, 1995, vol. 29, no. 7, pp. 318A–323A. <https://doi.org/10.1021/es00007a747>

33. Stefanou S., Papazafeiriou A.Z. The Effect of Soil Physical Properties of an Entisol on the Growth of Young Poplar Trees (*Populus* sp.). *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 2014, vol. 20, no. 4, pp. 807–812.

34. Stokes A., Mattheck C. Variation of Wood Strength in Tree Roots. *Journal of Experimental Botany*, 1996, vol. 47, iss. 5, pp. 693–699. <https://doi.org/10.1093/jxb/47.5.693>

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