

Научная статья

УДК 630*232.43+631.535+631.53.031+712.414

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-2-29-48

Синтетические укрытия вегетационных сооружений с интегрированным фотолюминофором в укоренении черенков туи западной

Н.Н. Бессчетнова¹, *д-р с.-х. наук*; *ResearcherID: H-1343-2019*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7140-8797>

В.П. Бессчетнов¹, *д-р биол. наук*; *ResearcherID: S-5889-2016*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5024-7464>

Р.Н. Храмов², *канд. физ.-мат. наук*; *ResearcherID: B-9591-2014*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6504-4694>

Н.А. Бабич³, *д-р с.-х. наук, проф.*; *ResearcherID: G-7384-2019*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7463-2519>

В.И. Мелехов³, *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: Q-1051-2019*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>

¹Нижегородский государственный агротехнологический университет, просп. Гагарина, д. 97, г. Нижний Новгород, Россия, 603107; besschetnova1966@mail.ru, lesfak@bk.ru[✉]


²Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН, ул. Институтская, д. 3, г. Пущино, Московская обл., Россия, 142290; khramov30@mail.ru

³Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; forest@narfu.ru, v. melekhov@narfu.ru

Поступила в редакцию 01.03.23 / Одобрена после рецензирования 12.06.23 / Принята к печати 14.06.23

Аннотация. Изучена эффективность применения светокорректирующих укрывных материалов для вегетационных сооружений при укоренении черенков различных декоративных форм и сортов туи западной (*Thuja occidentalis* L.). Испытывали 2 типа укрытий: модифицированный спанбонд плотностью 30 г/м² с интегрированным в его структуру фотолюминофором в концентрации 0,8 % и немодифицированный спанбонд такой же плотности. Люминофором являлся оксисульфид иттрия, легированный европием (Y₂O₂SEu). Анализировали 11 сортов и форм туи: Rheingold, Mr. Bowing Boll, Woodwardii, Tiny Tim, Golden Smaragd, Mirjam, Golden Globe, Danica, Sunkist, Smaragd, Brabant. Тестировали реакцию показателей каллусогенеза и ризогенеза на влияние трансформированного светового потока. Установили положительный эффект применения фотолюминофоров при укоренении стеблевых черенков туи западной. Зафиксировали увеличение характеристик регенерационной способности и пострегенерационного развития корневых систем и надземной части черенков: активности каллусогенеза, количества образовавшихся придаточных корней, длины лидирующего корня, суммарной протяженности корневых систем, высоты надземной части и диаметра корневой шейки. Образование каллуса повысилось с 67,59±2,05 % в контроле до 76,81±1,61 % в варианте с люминофором; количество сформировавшихся придаточных корней – с 9,64±0,43 до 11,44±0,34 шт. соответственно; суммарная протяженность корневых систем – с 64,56±3,70 до 75,52±2,77 см соответственно. Однофакторный дисперсионный анализ подтвердил существенность различий между испытываемыми формами и сортами в каждом из вариантов укрытий по большинству

© Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Храмов Р.Н., Бабич Н.А., Мелехов В.И., 2024

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

тестируемых показателей. Двухфакторный дисперсионный анализ вскрыл достоверный эффект положительного влияния фотолуминофоров на образование каллуса, возникновение придаточных корней, пострегенерационное развитие корневых систем и надземной части черенков.

Ключевые слова: фотолуминофор, светотрансформирующие материалы, теплица, туя западная, черенки, укоренение, регенерационная способность, каллусогенез, корнеобразование

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, госзадание № 075-01025-23-01.

Для цитирования: Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Храмов Р.Н., Бабич Н.А., Мелехов В.И. Синтетические укрытия вегетационных сооружений с интегрированным фотолуминофором в укоренении черенков туи западной // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 2. С. 29–48. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-29-48>

Original article

The Use of Synthetic Shelters with Integrated Photoluminescent Phosphors for Greenhouse Structures in Rooting the Northern White-Cedar Cuttings

*Natal'ya N. Besschetnova*¹, Doctor of Agriculture; ResearcherID: [H-1343-2019](https://orcid.org/0000-0002-7140-8797),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7140-8797>

Vladimir P. Besschetnov^{1✉}, Doctor of Biology; ResearcherID: [S-5889-2016](https://orcid.org/0000-0001-5024-7464),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5024-7464>

*Robert N. Khramov*², Candidate of Physics and Mathematics;

ResearcherID: [B-9591-2014](https://orcid.org/0000-0001-6504-4694), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6504-4694>

*Nikolai A. Babich*³, Doctor of Agriculture; ResearcherID: [G-7384-2019](https://orcid.org/0000-0001-7463-2519),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7463-2519>

*Vladimir I. Melekhov*³, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Q-1051-2019](https://orcid.org/0000-0002-2583-3012),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>

¹Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, prosp. Gagarina, 97, Nizhny Novgorod, 603107, Russian Federation; besschetnova1966@mail.ru, lesfak@bk.ru[✉]

²Institute of Theoretical and Experimental Biophysics of the Russian Academy of Sciences, ul. Institutskaya, 3, Pushchino, Moscow Region, 142290, Russian Federation; khramov30@mail.ru

³Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; forest@narfu.ru, v.melekhov@narfu.ru

Received on March 1, 2023 / Approved after reviewing on June 12, 2023 / Accepted on June 14, 2023

Abstract. We have explored the effectiveness of using light-correcting covering materials for greenhouse structures when rooting the cuttings of various ornamental forms and varieties of the northern white-cedar (*Thuja occidentalis* L.). Two types of shelters have been tested: the modified spunbond at a density of 30 g/m² with a photoluminescent phosphor integrated into its structure at a concentration of 0.8 % and the unmodified spunbond at the same density. Europium-doped yttrium oxysulfide (Y₂O₂SEu) has been chosen as a photoluminescent phosphor. We have analyzed 11 varieties and forms of *Thuja occidentalis* L.: *Rheingold*, *Mr. Bowling Ball*, *Woodwardii*, *Tiny Tim*, *Golden Smaragd*, *Mirjam*, *Golden Globe*, *Danica*, *Sunkist*, *Smaragd* and *Brabant*. The response of the indicators of callusogenesis and



rhizogenesis to the influence of a transformed light flux has been tested. A positive effect of the use of photoluminescent phosphors in rooting the stem cuttings of the northern white-cedar has been established. An increase in the indicators of regenerative ability and post-regenerative development of the root systems and the aboveground parts of the cuttings has been recorded, such as: the activity of callusogenesis, the number of adventitious roots formed, the length of the leading root, the total length of the root system, the height of the aboveground part and the diameter of the root collar. Callusogenesis has increased from 67.59 ± 2.05 % in the check to 76.81 ± 1.61 % when having integrated the photoluminescent phosphor. The number of adventitious roots formed has increased from 9.64 ± 0.43 to 11.44 ± 0.34 pcs., correspondingly. The total length of the root systems has increased from 64.56 ± 3.70 to 75.52 ± 2.77 cm, correspondingly. One-way analysis of variance confirmed the significance of the differences between the tested forms and varieties in each of the shelter options for most of the tested indicators. Two-way analysis of variance has revealed a significant effect of the positive impact of photoluminescent phosphors on callusogenesis, adventitious root formation, post-regenerative development of the root systems and the aboveground parts of the cuttings.

Keywords: photoluminescent phosphor, photo-transforming materials, greenhouse, northern white-cedar (*Thuja occidentalis* L.), cuttings, rooting, regenerative ability, callusogenesis, root formation

Acknowledgements: This work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, state assignment no. 075-01025-23-01.

For citation: Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Khramov R.N., Babich N.A., Melekhov V.I. The Use of Synthetic Shelters with Integrated Photoluminescent Phosphors for Greenhouse Structures in Rooting the Northern White-Cedar Cuttings. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 2, pp. 29–48. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-29-48>

Введение

Действенной мерой снижения экологической напряженности в границах урбанизированных территорий выступает развитие городского озеленения [7]. Его ядром служат насаждения из деревьев и кустарников, успешно выполняющих санитарно-гигиенические, декоративно-эстетические и рекреационно-бальнеологические функции. К числу таких деревьев относится туя западная (*Thuja occidentalis* L.), представленная многочисленными декоративными формами и сортами [2, 12, 20, 23, 33, 34]. Нередко сдерживающим фактором в активном привлечении высокоэффективных представителей экзотов для решения указанных задач является отсутствие достаточного количества посадочного материала требуемого уровня качества. Его тиражирование требует мобилизации самых разных технологий, включая укоренение черенков в вегетационных сооружениях [5, 6, 35, 39]. Результативность деятельности тепличных хозяйств во многом обусловлена техническими свойствами и оптическими характеристиками применяемых покрытий [9, 13, 14, 17, 25, 26, 32]. Использование в этих целях светообразующих и светокорректирующих пленок и пластиков позволяет регулировать оптические, спектральные и другие параметры светового потока в количественном и качественном отношении [3, 4, 13, 14, 18, 19, 21, 22, 25, 26, 37]. Свет является определяющим условием фотосинтеза для большинства растений зон с умеренным климатом [28], и влияние его физических параметров на жизненно важные процессы в растительных организмах дискутируется достаточно активно [16, 24–28]. Общеизвестна приоритетная роль светопоглощающих пигментов в процессе фотосинтеза

[27–29, 35]. В связи с этим многостороннему и последовательному изучению подвергается пигментный состав широкого списка древесных пород [1, 11, 24, 27]. Вместе с тем единого мнения по данным вопросам не сложилось. Так, при воздействии ультрафиолетовой радиации на псевдотсугу Мензиса (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) не зафиксировано существенных изменений в содержании хлорофилла [11]. При этом есть сведения об образовании хлорофилла и каротиноидов в темноте [36].

Цель исследования – оценить эффективность применения светотрансформирующего укрытия вегетационных сооружений, состоящего из спанбонда с интегрированным в его структуру неорганическим фотолуминофором при укоренении физиологически активных стеблевых черенков туи западной.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования служили стеблевые черенки туи западной, находившиеся в активном физиологическом состоянии. В целях элиминации дифференцирующего влияния нерегулируемых в опыте случайных факторов черенки одновременно заготавливали в периферийной зоне среднего яруса хорошо освещенного участка кроны. Побеги с аномалиями развития и признаками поражения биотическими или абиотическими факторами отбраковывали и исключали из выборки. Испытываемые культивары получили следующие условные обозначения: Rheingold – сорт-1, Mr. Bowing Boll – сорт-2, Woodwardii – сорт-3, Tiny Tim – сорт-4, Golden Smaragd – сорт-5, Mirjam – сорт-6, Golden Globe – сорт-7, Danica – сорт-8, Sunkist – сорт-9, Smaragd – сорт-10, Brabant – сорт-11. Все маточные растения дислоцированы в границах единого опытного участка – дендропарка Нижегородского государственного агроуниверситета с географическими координатами 56°19'43" с. ш. 44°00'07" в. д. и высотой над уровнем моря 141 м. Данная территория включена в зону хвойно-широколиственных лесов и отнесена к району хвойно-широколиственных (смешанных) лесов европейской части Российской Федерации. В организационно-методической схеме опыта исследуемые декоративные формы и сорта были объединены в 4 группы по критериям морфологии строения кроны и пигментации хвои (табл. 1).

Таблица 1

Структура сформированных групп декоративных форм и сортов туи западной в составе анализируемого комплекса для каждого варианта укрытия
The structure of the formed groups of the northern white-cedar (*Thuja occidentalis* L.) ornamental forms and varieties as part of the analyzed complex for each shelter option

Группа	Морфологические дескрипторы группы		Сорта, декоративные формы <i>Thuja occidentalis</i>
	форма кроны	цвет хвои	
1	Шаровидная	Золотистый	Rheingold, Mirjam, Golden Globe
2		Зеленый	Mr. Bowing Boll, Woodwardii, Tiny Tim, Danica
3	Конусовидная	Золотистый	Golden Smaragd, Sunkist
4		Зеленый	Smaragd, Brabant

В соответствии с принципом единственного логического различия все черенки высаживали по одной схеме размещения (5×10 см) в идентичных по конструкции и метрическим параметрам вегетационных сооружениях. В них поддерживались одинаковые для всех вариантов и повторностей опыта условия: температурный фон, освещенность, орошение, субстрат и пр. Контроль параметров среды осуществляли с помощью автоматической метеостанции Meteoscan PRO 929 RST02929. В качестве субстрата использовали крупнозернистый речной песок, стимулятором роста служил гетероауксин в концентрации 0,02 %, при экспозиции 18 ч. Влияние оптических характеристик укрывного материала вегетационных сооружений тестировали по реакции на него базовых показателей регенерации и пострегенеративного развития корневых систем и надземной части черенков декоративных форм и сортов туи западной (табл. 2).

Таблица 2

Тестируемые показатели регенерации и пострегенеративного развития корневых систем и надземной части черенков туи западной
The tested indicators of regeneration and post-regenerative development of the root systems and the aboveground parts of the northern white-cedar (*Thuja occidentalis* L.) cuttings

Категория показателей	Показатель	Индекс показателя
Регенерационные процессы, происходящие в базальной части черенков	Эффективность каллусогенеза – формирование недифференцированной образовательной ткани (каллуса) на нижнем срезе черенка	1
	Активность корнеобразования – количество придаточных корней, образовавшихся на нижнем срезе одного черенка	2
Пострегенеративное развитие корневых систем черенков	Длина лидирующего корня	3
	Общая протяженность корневых систем	4
	Общая средняя длина придаточных корней	5
	Суммарная длина боковых корней	6
	Средняя длина боковых корней	7
	Доля длины осевого корня в суммарной протяженности корневых систем	8
	Доля длины боковых корней в суммарной протяженности корневых систем	9
	Индекс равномерности развития корневых систем как отношение длины осевого корня к средней длине боковых корней	10
Пострегенеративное развитие надземной части укорененных черенков	Индекс сбалансированности развития корневых систем как отношение длины осевого корня к общей средней длине придаточных корней	11
	Высота надземной части черенков	12
	Диаметр корневой шейки черенков	13
	Сбалансированность развития надземной части как отношение высоты черенка к его диаметру	14

Эффективность применения в качестве укрывного материала промышленно выпускаемого спанбонда с интегрированным в его волокна фотолюминофором (ФЛ) испытана по двум типам укрывных материалов, которые

выступали вариантами (факторами) опыта. Первый тип – модифицированный фототрансформирующий спанбонд (ФС), в структуру которого интегрирован неорганический фотолюминофор – модифицированное укрывное полотно сельскохозяйственного назначения «Агрол» плотностью 30 г/м². Этот укрывной материал разработан Институтом синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН и ЗАО «Полисветан» (Москва). Опытная партия материала была произведена предприятием акционерного общества «Химволокно» г. Щекино Тульской области на основе нетканого термоскрепленного полипропиленового полотна и светотрансформирующей добавки. Введенный в состав укрывного материала фотолюминофор является оксисульфидом иттрия, легированного европием (Y₂O₂SEu) с размерами частиц 2–5 мкм, компании «Люминофор» (г. Фрязино Московской области).

Второй тип – обычный немодифицированный белый спандбонд (ОС) – укрывной материал для теплиц и парников, который также представляет собой нетканое термоскрепленное полипропиленовое полотно (агротекстиль) плотностью 30 г/м². Оно широко применяется для изготовления теплиц и подобных им сооружений, а также для защиты сеянцев, саженцев, кустов и деревьев от повреждения низкими температурами в зимний период. Материал проницаем для воды и воздуха, защищает растения от легких ночных заморозков (до 3–4 °С) и холодных туманов. Данное полотно создает благоприятный микроклимат и увеличивает период вегетации растений. Оба вида спанбонда (ФС и ОС) содержат фотостабилизатор в виде ультрафиолетового адсорбера и имеют достаточно высокую механическую прочность для использования в течение 2–3 сезонов.

Измерения освещенности солнечного излучения, проходящего через текстиль, выполнены в интервале длин волн 380–780 нм при ясном небе с помощью спектрометра МК350N Premium (производство UPRtek – United Power Research Technology Corporation, Тайвань). В указанных испытаниях приемник излучения был направлен на солнце под углом к горизонту 45°, а образцы текстиля помещали непосредственно на окно фотоприемника. Зафиксировано одинаковое для ФС и ОС интегральное пропускание солнечного излучения, близкое к 90 % [9, 25]. Введение в укрывной материал светотрансформирующих добавок (вариант ФС) изменяет спектральный состав солнечного излучения, частично преобразуя ультрафиолетовое излучение солнца в полезный биостимулирующий оранжево-красный свет [9, 25, 26]. Подобные материалы сочетают достоинства обычного агротекстиля с преимуществами укрывных светотрансформирующих пленок [8, 10, 25, 26]. Доза люминесцентного излучения, падающего на растения, получена в ходе дополнительных измерений спектра, пропускаемого силиконовой пленкой плотностью 30 г/м² с повышенным содержанием в ней фотолюминофора. По данным измерений, при интенсивности падающего на растения солнечного излучения 483 Вт/м² расчетная интенсивность дополнительного люминесцентного красного света была около 7 мВт/м². Это составляет очень малую долю (0,0014 %) от фотосинтетически активной радиации, которая используется растениями в процессе фотосинтеза в волновом диапазоне от 400 до 700 нм.

Первичная единица выборки представлена разовым учетом каждого из анализируемых показателей по вариантам и повторностям опыта: количество

адвентивных корней, образовавшихся на черенке; длина отдельного придаточного корня. Измерения высоты надземной части и протяженности корневых систем черенка проводили линейкой с точностью до 1 мм, диаметра шейки корня – электронным штангенциркулем Electronic Digital Caliper G06064731 с точностью до 0,1 мм. Статистический и дисперсионный анализ выполнены с учетом существующих методических разработок [15, 30, 31, 38, 40].

Результаты исследования и их обсуждение

Зафиксировано увеличение показателей регенерационной способности и пострегенерационного развития корневых систем и надземной части черенков: активности каллусогенеза, количества образовавшихся придаточных корней, длины лидирующего корня, суммарной протяженности корневых систем, высоты надземной части и диаметра корневой шейки. Данные о регенеративной способности черенков, полученные опытным путем, представлены на диаграммах (рис. 1, 2). Активность каллусогенеза на черенках форм и сортов туи западной была неодинаковой (рис. 1).

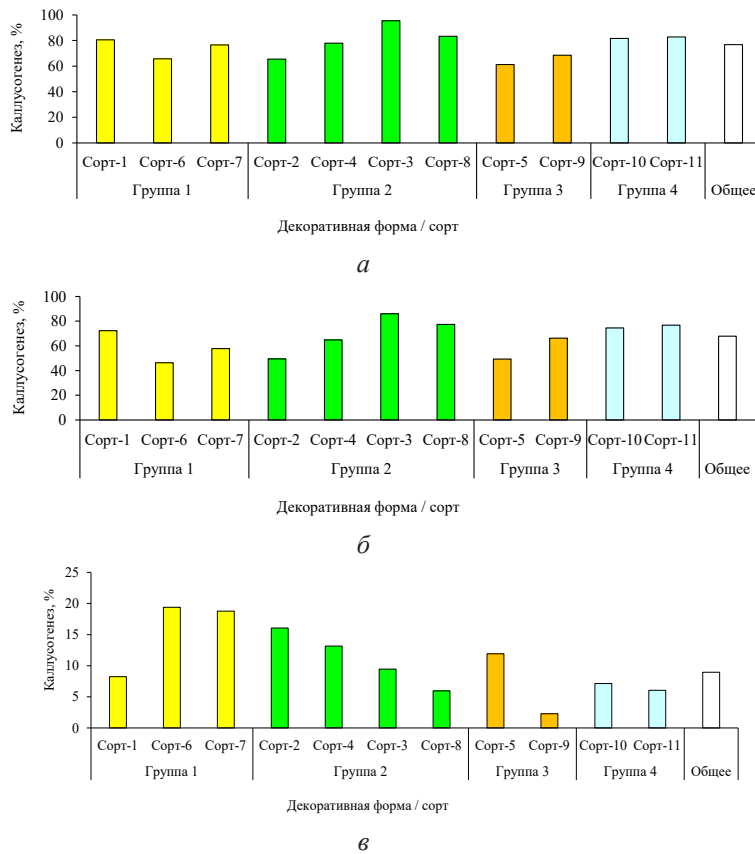


Рис. 1. Сравнение средних значений активности каллусогенеза на черенках туи западной: а – фототрансформирующее укрытие; б – обычный спанбонд; в – разность значений показателя (прирост величин)

Fig. 1. The comparison of the average values of callusogenesis activity on the northern white-cedar (*Thuja occidentalis* L.) cuttings: а – photo-transforming shelter; б – unmodified spunbond; в – the difference between the indicator values (the increase in the values)

Сопоставление этого показателя регенерационной способности у разных форм туи позволяет признать его некоторое повышение у сорта Woodwardii, имеющего шаровидную форму кроны и зеленую окраску хвои. Его значения составили: $95,45 \pm 2,47$ % (ФС) и $86,00 \pm 6,47$ % (ОС), что сформировало превышение первого над вторым на 9,45 %, или в 1,11 раза. Обобщенное для массива данных в варианте ФС значение составило $76,81 \pm 1,61$ %; в варианте ОС – $67,59 \pm 2,05$ %, превышение – 9,22 %, или 1,14 раза. Оно сформировалось на фоне единого обобщенного для всего массива данных среднего значения, которое достигло $72,41 \pm 1,31$ %. Расчетный коэффициент вариации ($C_v = 35,82$ %) позволил рассматривать изменчивость как соответствующую высокому уровню по шкале Мамаева ($C_v = 36 \dots 50$ %).

Не менее значимая характеристика регенерационной способности черенков – количество образовавшихся на них придаточных корней – также варьировала по декоративным формам и сортам туи западной и испытывала неодинаковое влияние разных по своим оптическим характеристикам укрывных материалов (ФС и ОС), что представлено на рис. 2.

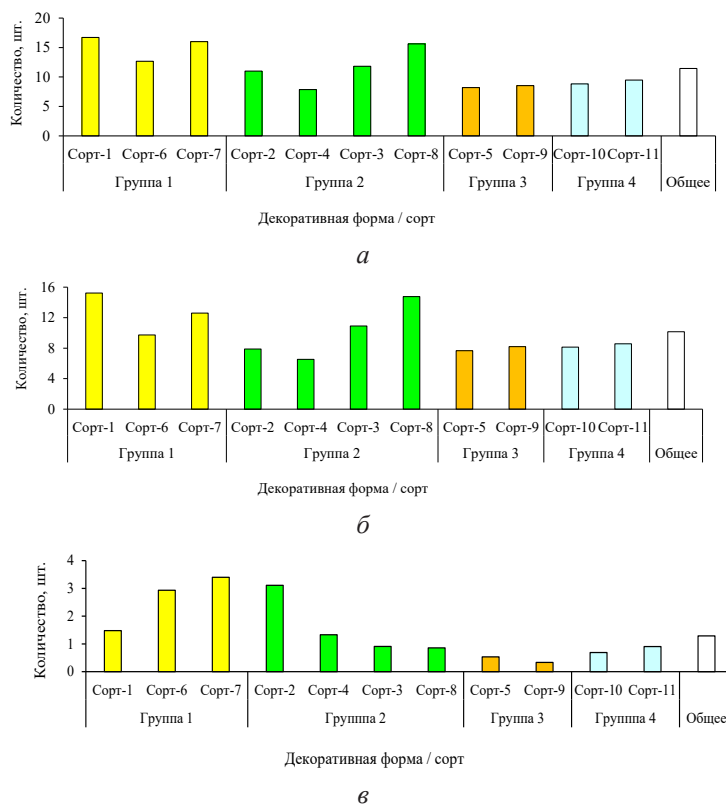


Рис. 2. Сравнение среднего количества придаточных корней на черенках туи западной: а – фототрансформирующее укрытие; б – обычный спанбонд; в – разность значений показателя (прирост величин)

Fig. 2. The comparison of the average values of the number of adventitious roots on the northern white-cedar (*Thuja occidentalis* L.) cuttings: а – photo-transforming shelter; б – unmodified spunbond; в – the difference between the indicator values (the increase in the values)

Наивысшие средние значения данного показателя в варианте ФС зафиксированы у Rheingold – $16,71 \pm 0,59$ шт.; Golden Globe – $16,00 \pm 0,62$ шт.; Danica – $15,62 \pm 0,60$ шт. В варианте ОС заметно выделялись на фоне других Rheingold – $15,23 \pm 1,67$ шт. и Danica – $14,76 \pm 1,12$ % шт. Следовательно, указанные декоративные формы и сорта устойчиво (в той или иной мере) занимали лидирующие позиции среди остальных по ризогенезу. Наибольший показатель в варианте ФС в этом случае превосходил максимум контрольного варианта (ОС) на 1,48 шт., или в 1,10 раза. Превышение обобщенных по вариантам опыта значений ($11,44 \pm 0,34$ и $9,64 \pm 0,43$ шт. – для ФС и ОС соответственно) составило 1,81 шт., или 1,19 раза. При этом обобщенное по 2 типам укрытия среднее значение равнялось $10,58 \pm 0,27$ шт., а коэффициент вариации ($Cv = 51,27$ %) в этом случае оценил изменчивость как очень высокую ($Cv > 50$ %).

Реакция показателей пострегенеративного развития придаточных корней на применение разных типов укрывного материала проявилась неодинаково. По длине лидирующего корня различия отчетливо наблюдались как между сравниваемыми формами и сортами, так и между вариантами ФС и ОС (рис. 3).

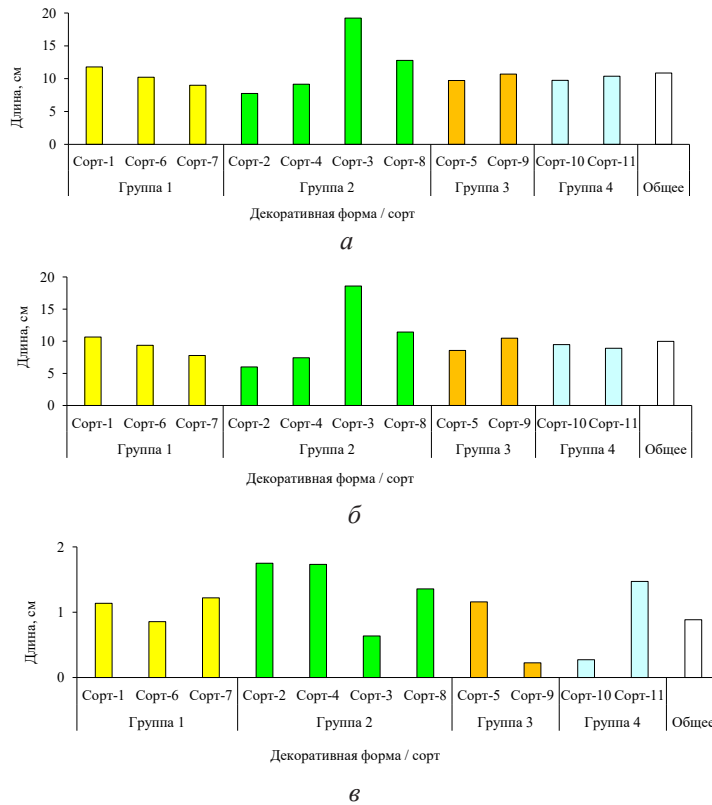


Рис. 3. Сравнение средних длин лидирующего корня черенков туи западной: а – фототрансформирующее укрытие; б – обычный спанбонд; в – разность значений показателя (прирост величин)

Fig. 3. The comparison of the average values of the length of the leading root of the northern white-cedar (*Thuja occidentalis* L.) cuttings: а – photo-transforming shelter; б – unmodified spunbond; в – the difference between the indicator values (the increase in the values)

Наибольшие значения показатель приобретал у сортов Woodwardii и Danica: в варианте ФС – $19,23 \pm 0,96$ и $12,79 \pm 0,49$ см; в варианте ОС – $18,59 \pm 1,02$ и $11,43 \pm 0,44$ см соответственно. Несмотря на незначительные расхождения значений, в варианте с ФС отмечено некоторое возрастание показателя: на 0,64 см, или в 1,03 раза (сорт-3); на 1,36 см, или в 1,12 раза (сорт-8). Обобщенные по вариантам укрытий значения достигли $10,86 \pm 0,31$ (ФС) и $9,88 \pm 0,33$ (ОС) см, что сформировало превышение в варианте с ФС на 0,99 см, или в 1,10 раза. Среднее значение для объединенного по всем вариантам опыта массива составило $10,39 \pm 0,23$ см, а коэффициент вариации ($C_v = 43,46\%$) определил изменчивость как высокую ($C_v = 36...50\%$).

Наиболее информативный показатель развития корневых систем – их общая суммарная протяженность – оказался достаточно восприимчивым к изменению условий освещенности, которое вызывалось введением в схему опыта ФС (рис. 4).

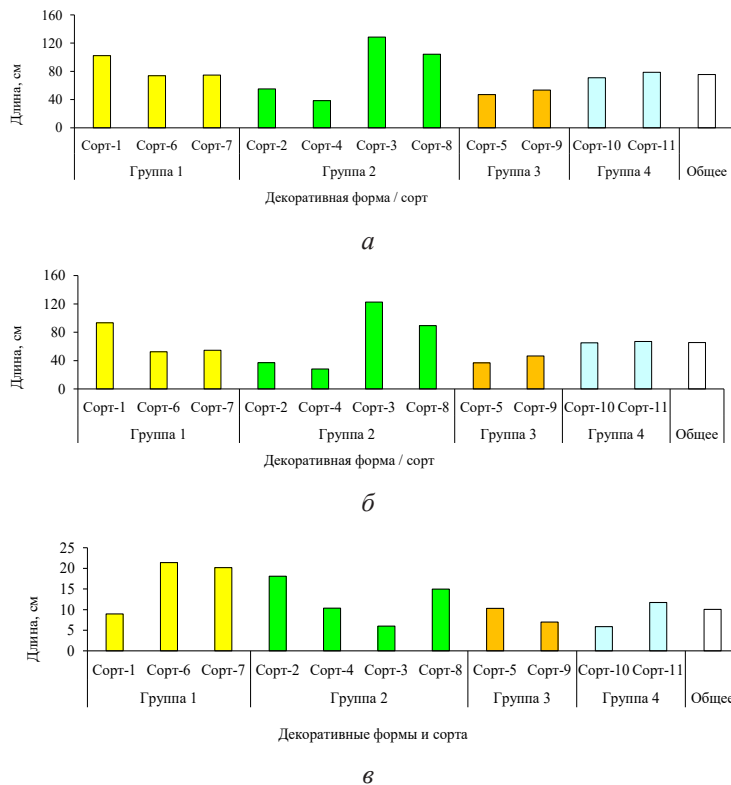


Рис. 4. Сравнение средних значений суммарной протяженности корневых систем на черенках туи западной: *a* – фототрансформирующее укрытие; *б* – обычный спанбонд; *в* – разность значений показателя (прирост величин)

Fig. 4. The comparison of the average values of the total length of the root system on the northern white-cedar (*Thuja occidentalis* L.) cuttings: *a* – photo-transforming shelter; *б* – unmodified spunbond; *в* – the difference between the indicator values (the increase in the values)

Лучшие результаты по данному показателю в целом продемонстрировали те же декоративные формы и сорта туи западной, что и по длине осевого корня: Rheingold, Woodwardii и Danica. Для них в варианте ФС соответственно за-

фиксированы значения: $102,29 \pm 5,75$; $128,59 \pm 7,93$ и $104,30 \pm 4,27$ см. В варианте ОС – $93,33 \pm 14,26$; $122,59 \pm 17,92$ и $89,33 \pm 8,66$ см. Как и по ранее проанализированным показателям, в данном случае также наблюдался слабый положительный эффект применения ФС: по сорту Rheingold – на 8,95 см, или в 1,10 раза; по Woodwardii – на 6,00 см, или в 1,05 раза, и по Danica – на 14,97 см, или в 1,17 раза. Превышение обобщенных средних значений по каждому из вариантов составило 10,96 см, или 1,17 раза. Однако увеличение показателя по сортам с общим меньшим средним значением признака было заметно более ощутимым и равнялось: у сорта Golden Globe – 62,02 см, или 5,87 раза; у Mirjam – 21,40 см, или 1,41 раза; у Mr. Bowing Boll – на 18,09 см, или 1,49 раза. Такая картина сложилась на фоне обобщенной для всех вариантов и повторностей опыта оценки: $70,29 \pm 2,29$ см. Коэффициент вариации, полученный для данного случая ($C_v = 64,63 \%$), говорит об очень высоком уровне изменчивости ($C_v > 50 \%$). Таким образом, показатели пострегенеративного развития надземной части черенков в своих реакциях на применение укрывных материалов с разными оптическими свойствами, как и другие характеристики, рассматриваемые в данном опыте, были неодинаковы.

Зафиксированная фенотипическая неоднородность показателей сравниваемых форм и сортов проявилась на выровненном фоне экологических условий (параметры среды в каждом отдельном вегетационном сооружении абсолютно идентичны), что дало основание признать различия обусловленными внутренними особенностями самих растений, определяемыми спецификой их генотипа. Подтверждение этому было получено в ходе выполнения однофакторного дисперсионного анализа по показателям регенерационной способности черенков и пострегенерационного развития их корневых систем и надземной части (табл. 3). Анализ позволил оценить масштаб влияния различий в происхождении черенкового материала (принадлежность к той или иной декоративной форме или сорту) на формирование общего фона фенотипической дисперсии.

Из данных табл. 3 следует, что по всем показателям регенерационной способности исследуемых декоративных форм и сортов туи западной различия были существенными – опытные критерии Фишера значительно превышали соответствующие табличные величины для заданного числа степеней свободы как на 5%-м, так и на 1%-м уровнях значимости, принимая значения от 3,35 (признак 1) до 17,35 (признак 2). В такой ситуации дисперсионный анализ уверенно опроверг нулевую гипотезу о том, что различий между представителями рассматриваемых видов и декоративных форм в варианте укоренения черенков с использованием ФС не существует. Это позволило продолжить проведение анализа в части вычисления доли влияния организованного фактора (в нашем случае – эндогенная специфика регенерационной способности биологических образцов, обусловленная принадлежностью к сорту) на формирование общей фенотипической дисперсии. В расчетах по алгоритму Плохинского значения показателя составили от $14,72 \pm 4,40 \%$ ($F_h^2 = 3,35$; $F_{05/01} = 1,88/2,41$) по признаку 1 до $47,22 \pm 2,24 \%$ ($F_h^2 = 3,71$; $F_{05/01} = 1,88/2,41$) по признаку 2. Вычисление тех же значений по алгоритму Снедекора дало вполне сопоставимый результат.

Таблица 3

Существенность различий между формами и сортами туи западной по показателям регенерационной способности черенков при их укоренении под светотрансформирующим и обычным укрытием (по данным однофакторного дисперсионного анализа)
 The significance of the differences between the northern white-cedar (*Thuja occidentalis* L.) forms and varieties in terms of the indicators of regenerative ability of the cuttings rooted under the photo-transforming and the unmodified shelter (according to one-way analysis of variance)

Показатель	F _{оп}	Доля влияния фактора (h ² ±s _h ²)						Критерии различий	
		по Плохинскому			по Снедекору				
		h ²	±s _h ²	F _h ²	h ²	±s _h ²	F _h ²	HCP ₀₅	D ₀₅
<i>ФС</i>									
1	3,35	0,1472	0,0440	3,3487	0,1134	0,0457	2,4818	14,275	24,470
2	17,35	0,4722	0,0272	17,3547	0,4711	0,0273	17,2811	2,379	4,079
3	7,38	0,2756	0,0373	7,3822	0,2579	0,0383	6,7437	2,561	4,390
4	13,14	0,4039	0,0307	13,1443	0,3981	0,0310	12,8322	20,487	35,119
5	13,54	0,4111	0,0304	13,5426	0,4059	0,0306	13,2530	1,247	2,138
6	13,11	0,4032	0,0308	13,1066	0,3974	0,0311	12,7924	19,014	32,594
7	10,82	0,3581	0,0331	10,8208	0,3485	0,0336	10,3771	1,466	2,512
8	9,43	0,3270	0,0347	9,4278	0,3146	0,0353	8,9052	0,056	0,097
9	9,43	0,3270	0,0347	9,4278	0,3146	0,0353	8,9052	0,056	0,097
10	4,53	0,1894	0,0418	4,5314	0,1613	0,0432	3,7315	0,474	0,813
11	4,93	0,2028	0,0411	4,9348	0,1765	0,0424	4,1577	0,346	0,593
12	12,02	0,3825	0,0318	12,0166	0,3750	0,0322	11,6406	1,488	2,551
13	14,52	0,4280	0,0295	14,5150	0,4240	0,0297	14,2806	0,413	0,708
14	5,85	0,2346	0,0401	5,8542	0,2120	0,0413	5,1381	0,978	1,677
<i>ОС</i>									
1	4,42	0,2007	0,0454	4,4183	0,1697	0,0472	3,5980	17,643	30,243
2	8,93	0,3366	0,0377	8,9315	0,3217	0,0385	8,3486	3,341	5,727
3	9,46	0,3496	0,0370	9,4611	0,3360	0,0377	8,9060	2,556	4,382
4	6,77	0,2778	0,0410	6,7709	0,2566	0,0422	6,0743	30,244	51,844
5	9,15	0,3421	0,0374	9,1534	0,3278	0,0382	8,5821	1,609	2,759
6	6,35	0,2651	0,0418	6,3481	0,2423	0,0430	5,6293	28,697	49,192
7	8,15	0,3165	0,0388	8,1483	0,2995	0,0398	7,5241	1,734	2,972
8	7,00	0,2847	0,0406	7,0049	0,2642	0,0418	6,3206	0,089	0,153
9	7,00	0,2847	0,0406	7,0049	0,2642	0,0418	6,3206	0,089	0,153
10	3,13	0,1509	0,0482	3,1277	0,1129	0,0504	2,2396	0,653	1,119
11	5,61	0,2418	0,0431	5,6143	0,2163	0,0445	4,8569	0,341	0,584
12	19,92	0,5309	0,0267	19,9157	0,5308	0,0267	19,9102	1,172	2,010
13	6,80	0,2787	0,0410	6,7998	0,2575	0,0422	6,1047	0,399	0,685
14	2,72	0,1337	0,0492	2,7173	0,0931	0,0515	1,8076	1,178	2,020

Примечание: F_{оп} – опытное значение критерия Фишера; F₀₅, F₀₁ – табличное значение критерия Фишера на 5%-м (F₀₅ = 1,88) и 1%-м уровнях значимости (F₀₁ = 2,41) соответственно; h² – доля влияния организованного фактора; ±s_h² – ошибка доли влияния организованного фактора; F_h² – критерий Фишера в оценке достоверности доли влияния организованного фактора; HCP₀₅ – наименьшая существенная разность на 5%-м уровне значимости; D₀₅ – критерий Тьюки на 5%-м уровне значимости.

Дисперсионный анализ по той же схеме для вегетационных сооружений с укрытием из ОС сохранил в основных чертах соотношение данных, полученных при дисперсионном анализе для вегетационных сооружений с ФС (табл. 3). Можно констатировать, что по всем показателям регенерационной способности декоративных форм и сортов различия между ними существенны. Данное утверждение обосновано зафиксированным превышением расчетными F-критериями соответствующих им табличных пределов для принятых в опыте уровней точности (5%-й и 1%-й) и заданного числа степеней свободы. Вычисление силы влияния организованного фактора по тестируемым признакам обнаружило, что наибольшие значения свойственны признаку 12: $53,09 \pm 2,67$ % ($F_h^2 = 19,92$; $F_{05/01} = 1,88/2,41$), а наименьшие – признаку 14: $13,37 \pm 4,92$ % ($F_h^2 = 2,72$; $F_{05/01} = 1,88/2,41$). В итоге указанные величины свидетельствуют о выраженных различиях между формами и сортами по линейным параметрам надземной части черенков при весьма стабильном отношении высоты к диаметру, что вполне характерно для большинства хвойных видов, к числу которых относится и туя западная.

Эффективность применения ФС и ОС при укоренении черенков декоративных форм и сортов туи западной позволил охарактеризовать двухфакторный дисперсионный анализ (табл. 4). При этом факторная структура дисперсионного комплекса предусматривала возможность дифференцированного учета влияния различий в технологических аспектах укоренения (фактор А), что рассматривалось как испытание разных по оптико-физическим свойствам укрывных материалов – ФС и ОС, а также различий, обусловленных принадлежностью испытываемых растений к сравниваемым декоративным формам и сортам (фактор В). Принятая организационно-методическая схема опыта дала возможность не только вскрыть силу влияния каждого из его организованных факторов отдельно, но и оценить их консолидированный импакт-эффект во взаимодействии (фактор АВ).

Влияние различий между оптическими свойствами укрывных материалов в соответствии с критериями Фишера в подавляющем числе показателей (10 из 14) является существенным, однако у некоторой их части (признаки 5, 10–12) оно незначительно (табл. 4). В тех случаях, когда эффективность действия указанного фактора получала подтверждение (F-критерии превысили предельно допустимый порог), максимум оценок ($6,04 \pm 0,25$ %) соответствовал признакам 8 и 9 – их доля возросла, а минимум ($0,78 \pm 0,27$ %) – признаку 7. Следует отметить, что последний показатель статистически достоверен на 5%-м уровне значимости и недостоверен на 1%-м. Хорошо заметный на фоне проявления по другим признакам достоверный эффект зафиксирован по признаку 2: $5,68 \pm 0,25$ %. По остальным показателям регенерационной способности черенков, по которым существенность различий была подтверждена, эффект замены ОС на ФС выразился в статистически достоверном изменении их значений как в большую (признаки 1–4, 6–8, 13), так и в меньшую (признак 9) или в ту и другую (признак 14) стороны. В отдельных случаях (признаки 5, 10–12), как было отмечено ранее, статистически достоверного изменения показателей не произошло. Приведенные результаты, полученные на основе расчетного алгоритма Плохинского, сопоставимы с достигнутыми в вычислениях по алгоритму Снедекора.

Таблица 4

Эффективность применения различных типов укрывного материала при укоренении черенков декоративных форм и сортов туи западной (по данным двухфакторного дисперсионного анализа)

The effectiveness of the use of different types of covering materials in rooting the cuttings of the northern white-cedar (*Thuja occidentalis* L.) ornamental forms and varieties (according to two-way analysis of variance)

Показатель	Источник дисперсии, фактор влияния	F _{он}	Доля влияния фактора (h ² ±s _h ²)			
			по Плохинскому		по Снедекору	
			h ²	±s _h ²	h ²	±s _h ²
1	A	18,08	0,0389	0,0026	0,0700	0,0025
	B	6,48	0,1394	0,0233	0,1235	0,0237
	AB	1,19	0,0256	0,0263	0,0086	0,0268
	Z	–	0,7961	0,2039	0,7978	0,2022
2	A	35,76	0,0568	0,0025	0,0944	0,0024
	B	16,52	0,2623	0,0199	0,2317	0,0208
	AB	5,88	0,0934	0,0245	0,1458	0,0231
	Z	–	0,5876	0,4124	0,5281	0,4719
3	A	7,03	0,0129	0,0027	0,0218	0,0026
	B	16,39	0,3016	0,0189	0,3055	0,0188
	AB	0,26	0,0048	0,0269	–0,0294	0,0278
	Z	–	0,6808	0,3192	0,7021	0,2979
4	A	13,62	0,0244	0,0026	0,0429	0,0026
	B	16,29	0,2913	0,0192	0,2858	0,0193
	AB	1,27	0,0227	0,0264	0,0100	0,0268
	Z	–	0,6617	0,3383	0,6613	0,3387
5	A	3,11	0,0053	0,0027	0,0070	0,0027
	B	21,79	0,3681	0,0171	0,3799	0,0168
	AB	0,09	0,0016	0,0270	–0,0332	0,0279
	Z	–	0,6251	0,3749	0,6463	0,3537
6	A	13,38	0,0243	0,0026	0,0426	0,0026
	B	15,43	0,2799	0,0195	0,2733	0,0196
	AB	1,38	0,0250	0,0264	0,0142	0,0266
	Z	–	0,6709	0,3291	0,6698	0,3302
7	A	4,38	0,0078	0,0027	0,0119	0,0027
	B	18,33	0,3273	0,0182	0,3346	0,0180
	AB	0,24	0,0043	0,0269	–0,0293	0,0278
	Z	–	0,6606	0,3394	0,6828	0,3172
8	A	33,22	0,0604	0,0025	0,1011	0,0024
	B	9,62	0,1749	0,0223	0,1488	0,0230
	AB	5,05	0,0919	0,0245	0,1398	0,0232
	Z	–	0,6728	0,3272	0,6103	0,3897

Окончание табл. 4

Показатель	Источник дисперсии, фактор влияния	F _{оп}	Доля влияния фактора (h ² ±s _h ²)			
			по Плохинскому		по Снедекору	
			h ²	±s _h ²	h ²	±s _h ²
9	A	33,22	0,0604	0,0025	0,1011	0,0024
	B	9,62	0,1749	0,0223	0,1488	0,0230
	AB	5,05	0,0919	0,0245	0,1398	0,0232
	Z	–	0,6728	0,3272	0,6103	0,3897
10	A	0,05	0,0001	0,0027	–0,0042	0,0027
	B	6,24	0,1405	0,0232	0,1286	0,0236
	AB	1,14	0,0257	0,0263	0,0068	0,0268
	Z	–	0,8337	0,1663	0,8688	0,1312
11	A	3,59	0,0075	0,0027	0,0105	0,0027
	B	8,62	0,1808	0,0221	0,1698	0,0224
	AB	1,71	0,0359	0,0261	0,0317	0,0262
	Z	–	0,7758	0,2242	0,7880	0,2120
12	A	3,23	0,0049	0,0027	0,0065	0,0027
	B	28,33	0,4270	0,0155	0,4372	0,0152
	AB	0,70	0,0106	0,0267	–0,0094	0,0273
	Z	–	0,5575	0,4425	0,5657	0,4343
13	A	20,77	0,0338	0,0026	0,0598	0,0025
	B	20,54	0,3343	0,0180	0,3248	0,0182
	AB	1,83	0,0298	0,0262	0,0275	0,0263
	Z	–	0,6021	0,3979	0,5879	0,4121
14	A	9,85	0,0205	0,0026	0,0356	0,0026
	B	8,72	0,1818	0,0221	0,1708	0,0224
	AB	1,25	0,0260	0,0263	0,0109	0,0267
	Z	–	0,7717	0,2283	0,7827	0,2173

Примечание: Z – неорганизованный фактор, или остаточная дисперсия, соответствующая внутригрупповой (случайной) изменчивости, индуцируемой пестротой фона не учитываемых в опыте факторов среды. Для факторов A, B и AB F_{05/01} равняется соответственно 3,86/6,70; 1,85/2,37 и 1,85/2,37.

Материалы табл. 4 позволяют сделать заключение о высокой наследственной обусловленности различий между декоративными формами и сортами туи западной по показателям их регенерационной способности. Опытные критерии Фишера по фактору B для всех анализируемых признаков превосходят допустимые табличные значения. Однако влияние данного фактора на формирование общего фона фенотипической дисперсии по показателям регенерационной способности и пострегенерационного развития корневых систем и надземной части черенков туи западной неодинаково, и доля вызываемой ими дисперсии в расчетах по алгоритму Плохинского составила от 13,94±2,33 % (признак 1) и 14,05±2,32 % (признак 10) до 42,70±1,55 % (признак 12). По показателям 5, 7 и 13 значения составили: 36,81±1,71; 32,73±1,82 и 33,43±1,80 % соответственно.

Взаимодействие названных факторов, рассматриваемое как самостоятельный эффект влияния, в большинстве случаев демонстрировало малозаметное по сравнению с влиянием различий в свойствах укрывных материалов и тем более специфики наследственной природы сравниваемых форм и сортов воздействие на общий фон фенотипической изменчивости (табл. 4). По 11 показателям регенерационной способности черенков из 14 в данном дисперсионном анализе статистическая значимость эффекта взаимодействия как фактора влияния на общий фон дисперсии в целом не нашла подтверждения. В случаях, когда эффективность действия фактора АВ получала статистическое подтверждение, значения были достаточно выровнены: по признаку 2 – $9,34 \pm 2,45$ %; по признаку 8 – $9,19 \pm 2,45$ % и по признаку 9 – $9,19 \pm 2,45$ %. Для этих признаков существенность различий по фактору АВ получила подтверждение как на 5%-м, так и на 1%-м уровнях значимости. Влияние не учитываемых в опыте случайных факторов, формирующих так называемую остаточную дисперсию, которую традиционно связывают с неизбежной пестротой фоновых условий среды, доминировало и, превышая 50%-й рубеж, составило от 58,76 % (признак 2) и 55,75 % (признак 12) до 83,37 % (признак 10).

Выводы

1. Применение в качестве укрывных материалов для вегетационных сооружений модифицированного спанбонда с интегрированием в его структуру оксисульфида иттрия, легированного европием (Y_2O_3SEu), дает положительный эффект при укоренении черенков туи западной и вызывает увеличение ряда показателей регенерационной способности и пострегенерационного развития корневых систем и надземной части, таких как активность каллусогенеза, количество сформировавшихся придаточных корней, длина лидирующего корня, суммарная протяженность корневых систем, высота надземной части и диаметр корневой шейки.

2. Высокая чувствительность тестируемых показателей укоренения и последующего развития черенков туи западной к не учитываемым в опыте случайным факторам, влияние которых обусловлено пестротой фоновых условий среды, в значительной мере нивелировала возникающие в дисперсионных комплексах различия как между представителями сравниваемых декоративных форм и сортов, так и между вариантами применения неодинаковых по оптическим характеристикам укрывных материалов для вегетационных сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Котынова М.Ю. Сезонный характер содержания пигментов в хвое туи западной в условиях Нижегородской области // Тр. СПбНИИЛХ. 2022. № 3. С. 38–58.

Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Kotynova M.Yu. Seasonal Character of the Pigment Content in the Needles of Northern White-Cedar in the Conditions of the Nizhny Novgorod Region. *Trudy nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyajstva* =

Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute, 2022, no. 3, pp. 38–58. (In Russ.). <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2022.3.38>

2. Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Ханявин А.И., Акулинина М.А. Параметры шишек декоративных форм и сортов туи в условиях Нижегородского Поволжья при интродукции // Аграрная наука – сельскому хозяйству: сб. материалов XVII Междунар. науч.-практ. конф., Барнаул, 9–10 февр. 2022 г.: в 2 кн. Кн. 1. Барнаул: Алтайск. ГАУ, 2022. С. 323–325.

Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Khanyavin A.I., Akulinina M.A. Parameters of Cones of Decorative Forms and Varieties of Thuja in the Conditions of the Nizhny Novgorod Volga Region during Introduction. *Agrarian Science to Agriculture: Collection of Materials in 2 Books. XVII International Scientific and Practical Conference (Barnaul, February 9–10, 2022)*. Barnaul, the Altai State Agricultural University Publ., 2022, book 1, pp. 323–325. (In Russ.).

3. Иваницкий А.Е., Райда В.С., Минич А.С., Ивлев Г.А. Исследование свойств фотолюминесцентных пленок при возбуждении солнечным излучением // Вестн. ТГПУ. 2011. Вып. 8(110). С. 119–123.

Ivanitskiy A.E., Raida V.S., Minich A.S., Ivlev G.A. Research Properties of Photoluminescent Films at Excitation by a Solar Radiation. *Vestnik Tomskogo pedagogicheskogo universiteta* = Tomsk State Pedagogical University Bulletin, 2011, iss. 8(110), pp. 119–123. (In Russ.).

4. Карасев В.Е. Полисветаны – полимерные светотрансформирующие материалы для сельского хозяйства // Вестн. ДВО РАН. 1995. № 2. С. 66–73.

Karasev V.E. Polysvetans – Polymer Light-Transforming Materials for Agriculture. *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossijskoy akademii nauk* = Vestnik of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 1995, no. 2, pp. 66–73. (In Russ.).

5. Котынова М.Ю., Бессчетнов В.П. Регенерационная способность представителей рода туя при укоренении черенков в теплицах // Современное лесное хозяйство – проблемы и перспективы: материалы Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию ВНИИЛГИСБиотех, Воронеж, 3–4 дек. 2020 г. Воронеж: Истоки, 2020. С. 40–43.

Kotynova M.Yu., Besschetnov V.P. Regenerative Ability of Representatives of the Genus Thuja When Rooting the Cuttings in Greenhouses. *Modern Forestry – Problems and Prospects: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference Dedicated to the 50th Anniversary of the All-Russian Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology (Voronezh, December 3–4, 2020)*. Voronezh, Istoki Publ., 2020, pp. 40–43. (In Russ.).

6. Котынова М.Ю., Бессчетнов В.П., Бессчетнова Н.Н. Укоренение черенков декоративных форм туи западной (*Thuja occidentalis* L.) в теплицах // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы XVIII Междунар. науч.-техн. конф., Вологда, 1 дек. 2020 г. / отв. ред. С.М. Хамитова. Вологда: ВоГУ, 2020. С. 147–149.

Kotynova M.Yu., Besschetnov V.P., Besschetnova N.N. Rooting the Cuttings of Ornamental Forms of the Northern White-Cedar (*Thuja occidentalis* L.) in Greenhouses. *Actual Problems of the Development of the Forest Complex: Materials of XVIII International Scientific and Technical Conference (Vologda, December 1, 2020)*. Ed.-in-chief S.M. Khamitova. Vologda, Vologda State University Publ., 2020, pp. 147–149. (In Russ.).

7. Ляховенко О.И., Чулков Д.И. Основные экологические проблемы российских городов и стратегия их разрешения // Рус. политология – Russian political science. 2017. № 3(4). С. 21–26.

Lyakhovenko O.I., Chulkov D.I. The Main Environmental Problems of the Russian Cities and the Strategy for Their Resolution. *Russkaya politologiya* = Russian Political Science, 2017, no. 3(4), pp. 21–26. (In Russ.).

8. Минич А.С., Минич И.Б., Зеленчукова Н.С., Карначук Р.А., Головацкая И.Ф., Ефимова М.В., Райда В.С. Роль красного люминесцентного излучения низкой интенсивности в регуляции морфогенеза и гормонального баланса *Arabidopsis thaliana* // Физиология растений. 2006. Т. 53, № 6. С. 863–868.

Minich A.S., Minich I.B., Zelen'chukova N.S., Karnachuk R.A., Golovatskaya I.F., Efimova M.V., Rajda V.S. The Role of Low Intensity Red Luminescent Radiation in the Control of *Arabidopsis thaliana* Morphogenesis and Hormonal Balance. *Fiziologiya Rasteniy* = Russian Journal of Plant Physiology, 2006, vol. 53, no. 6, pp. 863–868. (In Russ.).

9. Храмов Р.Н., Бессчетнов В.П., Бессчетнова Н.Н., Гаврилова А.А. Нанокompозитные светотрансформирующие укрывные материалы в лесном и сельском хозяйстве // Элементная база отечественной радиоэлектроники: импортозамещение и применение: тр. II Рос.-белорус. науч.-техн. конф. им. О.В. Лосева, посвящ. 70-летию Победы в Велик. Отечеств. войне, 70-летию образования РНТОРЭС им. А.С. Попова, Всемир. Году Света, Н. Новгород, 17–19 нояб. 2015 г. Н. Новгород: ННГУ, 2015. С. 325–328.

Khramov R.N., Besschetnov V.P., Besschetnova N.N., Gavrilova A.A. Nanocomposite Light-Transforming Covering Materials in Forestry and Agriculture. *The Element Base of Domestic Radio Electronics: Import Substitution and Application: Proceedings of the II Russian-Belarusian Scientific and Technical Conference named after O.V. Losev., Dedicated to the 70th Anniversary of the Victory in the Great Patriotic War, the 70th anniversary of the RSTSREEC named after A.S. Popov and the International Year of Light (Nizhny Novgorod, November 17–19, 2015)*. Nizhny Novgorod, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod Publ., 2015, pp. 325–328. (In Russ.).

10. Щелокоев Р.Н. Полисветаны и полисветановый эффект // Изв. АН СССР. 1986. № 10. С. 50–55.

Shchelokov R.N. Polysvetans and Polysvetan Effects. *Proceedings of the USSR Academy of Sciences*, 1986, no. 10, pp. 50–55. (In Russ.).

11. Bassman J.H., Edwards G.E., Robberecht R. Long-Term Exposure to Enhanced UV-B Radiation is not Detrimental to Growth and Photosynthesis in Douglas-Fir. *New Phytologist*, 2002, vol. 154, iss. 1, pp. 107–120. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2002.00354.x>

12. Beardmore T.A., Loo J., McAfee B., Malouin C., Simpson D. A Survey of Tree Species of Concern in Canada: the Role for Genetic Conservation. *The Forestry Chronicle*, 2006, vol. 82, no. 3, pp. 351–363. <https://doi.org/10.5558/tfc82351-3>

13. Brown C.S., Schuerger A.C., Sager J.C. Growth and Photomorphogenesis of Pepper Plants under Red Light-Emitting Diodes with Supplemental Blue or Far-Red Lighting. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1995, vol. 120, iss. 5, pp. 808–813. <https://doi.org/10.21273/JASHS.120.5.808>

14. Brown R.P. Polymers in Agriculture and Horticulture. *RAPRA Review Reports*, 2004, vol. 15, no. 2, pp. 1–103.

15. Dean A., Voss D., Draguljić D. *Design and Analysis of Experiments (Springer Texts in Statistics)*. 2nd ed., kindle ed. Germany, Heidelberg, Springer-Verlag GmbH, 2017. 865 p.

16. Delprato M.L., Krapp A.R., Carillo N. Green Light to Plant Responses to Pathogens: The Role of Chloroplast Light-Dependent Signaling in Biotic Stress. *Photochemistry and Photobiology*, 2015, vol. 91, iss. 5, pp. 1004–1011. <https://doi.org/10.1111/php.12466>

17. Edser C. Light Manipulating Additives Extend Opportunities for Agricultural Plastic Films. *Plastics, Additives and Compounding*, 2002, vol. 4, iss. 3, pp. 20–24. [https://doi.org/10.1016/S1464-391X\(02\)80079-4](https://doi.org/10.1016/S1464-391X(02)80079-4)

18. Espi E., Salmerón A., Fontecha A., García-Alonso Y., Real A.I. New Ultrathermic Films for Greenhouse Covers. *Journal of Plastic Film & Sheeting*, 2006, vol. 22, iss. 1, pp. 59–68. <https://doi.org/10.1177/8756087906062764>
19. Espi E., Salmerón A., Fontecha A., García-Alonso Y., Real A.I. Plastic Films for Agricultural Applications. *Journal of Plastic Film and Sheeting*, 2006, vol. 22, iss. 2, pp. 85–102. <https://doi.org/10.1177/8756087906064220>
20. Fowler D.P. Western Red Cedar (*Thuja plicata* Donn) in Nova Scotia. *The Forestry Chronicle*, 1981, vol. 57, no. 3, pp. 124–125. <https://doi.org/10.5558/tfc57124-3>
21. García-Alonso Y., Espi E., Salmerón A., Fontecha A., Gonzalez A. Viral Diseases Control with UV-Blocking Films in Greenhouses of Southern Spain. *Acta Horticulturae* 659, 2004, vol. 659, pp. 331–338. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.659.43>
22. González A., Rodríguez R., Bañón S., Franco J.A., Fernández J.A. The Influence of Photoselective Plastic Films as Greenhouse Cover on Sweet Pepper Yield and on Insect Pest Levels. *Acta Horticulturae* 559, 2001, vol. 559, pp. 233–238. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2001.559.34>
23. Grossnickle S.C., Russel J.H. Yellow-Cedar and Western Redcedar Ecophysiological Response to Fall, Winter and Early Spring Temperature Conditions. *Annals of Forest Science*, 2006, vol. 63, no. 1, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1051/forest:2005092>
24. Guo Y., Tan J. Recent Advances in the Application of Chlorophyll a Fluorescence from Photosystem II. *Photochemistry and Photobiology*, 2015, vol. 91, iss. 1, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1111/php.12362>
25. Khramov R.N., Kreslavski V.D., Svidchenko E.A., Surin N.M., Kosobryukhov A.A. Influence of Photoluminophore-Modified Agro Textile Spunbond on Growth and Photosynthesis of Cabbage and Lettuce Plants. *Optics Express*, 2019, vol. 27, iss. 2, pp. 31967–31977. <https://doi.org/10.1364/OE.27.031967>
26. Khramov R., Martynova N., Besschetnova N., Besschetnov V., Luponosov Yu. The Effectiveness of Agrotexile Cover with Organic Photoluminophore in Rooting Cuttings of Hungarian Lilac (*Syringa josikaea* J. Jacq. ex Rchb.). *BIO Web of Conferences*, 2022, vol. 42, art. no. 01017. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20224201017>
27. Lichtenhaller H.K. Biosynthesis and Accumulation of Isoprenoid Carotenoids and Chlorophylls and Emission of Isoprene by Leaf Chloroplasts. *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*, 2009, vol. 3, no. 3, pp. 81–94.
28. Linder S., Troeng E. Photosynthesis and Transpiration of 20-Year-Old Scots Pine. *Ecological Bulletins*, 1980, no. 32, pp. 165–181.
29. Losi A., Mandalari C., Gärtner W. The Evolution and Functional Role of Flavin-Based Prokaryotic Photoreceptors. *Photochemistry and Photobiology*, 2015, vol. 91, iss. 5, pp. 1021–1031. <https://doi.org/10.1111/php.12489>
30. Mason R.L., Gunst R.F., Hess J.L. *Statistical Design and Analysis of Experiments: With Applications to Engineering and Science*. 2nd. ed. New Jersey, Hoboken, Wiley-Interscience, 2003. 760 p.
31. Mead R., Curnow R.N., Hasted A.M. *Statistical Methods in Agriculture and Experimental Biology*. 3rd. ed. New York, Chapman and Hall/CRC, 2002. 488 p.
32. Max J.F.J., Schurr U., Tantau H.-J., Mutwiwa U.N., Hofmann T., Ulbrich A. Greenhouse Cover Technology. *Horticultural Reviews*, 2012, vol. 40, chapt. 7, pp. 259–396.
33. Noland T.L., Man R., Irvine M. Determining the Glyphosate Tolerance of Eastern White Cedar: First Year Post-Treatment Results. *The Forestry Chronicle*, 2015, vol. 91, no. 2, pp. 182–186. <https://doi.org/10.5558/tfc2015-029>

34. Pedlar J.H., McKenney D.W., Allen D., Lawrence K., Lawrence G., Campbell K. A Street Tree Survey for Canadian Communities: Protocol and Early Results. *The Forestry Chronicle*, 2013, vol. 89, no. 6, pp. 753–758. <https://doi.org/10.5558/tfc2013-137>
35. Scarratt J.B. Greenhouse Managers: Beware Combustion Fumes in Container Greenhouses. *The Forestry Chronicle*, 1985, vol. 61, no. 4, pp. 308–311. <https://doi.org/10.5558/tfc61308-4>
36. Schoefs B., Franck F. Chlorophyll Synthesis in Dark-Grown Pine Primary Needles. *Plant Physiology*, 1998, vol. 118, iss. 4, pp. 1159–1168. <https://doi.org/10.1104/pp.118.4.1159>
37. Semida W.M., Hadley P., Sobeih W., El-Saeah N.A., Barakat M.A.S. The Influence of Thermic Plastic Films on Vegetative and Reproductive Growth of Iceberg Lettuce ‘Dublin’. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Biological, Biomolecular, Agricultural, Food and Biotechnological Engineering*, 2013, vol. 7, no. 7, pp. 611–616.
38. Srinagesh K. *The Principles of Experimental Research*. 1st ed. United States, Massachusetts, Waltham, Butterworth-Heinemann, 2005. 432 p.
39. Thorpe T.A. Application of Tissue Culture Technology to Forest Tree Improvement. *The Forestry Chronicle*, 1985, vol. 61, no. 5, pp. 436–438. <https://doi.org/10.5558/tfc61436-5>
40. Zar J.H. *Biostatistical Analysis*. 5th ed. Pearson Education Limited, 2014. 756 p.

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