

Моделирование взаимодействия древесных семян с почвой при аэросеве

М.Н. Лысыч^{1а}, Д.Л. Бухтояров^{1b}, О.И. Гринько^{2с}, О.И. Григорьева^{3d}, И.В. Григорьев^{4е}, В.А. Иванов^{2f}

¹ Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, Россия

² Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., 5, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Арктический государственный агротехнологический университет, Сергеляхское шоссе, 3, Якутск, Республика Саха (Якутия), Россия

^а miklynea@yandex.ru, ^б vglta-mlx@yandex.ru, ^с goi2@yandex.ru ^д grigoreva_o@list.ru,

^е silver73@inbox.ru, ^ф ivanovva55@mail.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-3764-3873>, ^б <https://orcid.org/0000-0002-7428-0821>, ^с <https://orcid.org/0000-0003-1011-0329>,

^д <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>, ^е <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, ^ф <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>

Статья поступила 12.01.2022, принята 25.01.2022

Современные беспилотные летательные аппараты могут эффективно применяться для аэросева лесов. Особенностью аэросева является возможность быстрого лесовосстановления при невысоких затратах, что крайне актуально в сложившейся ситуации после катастрофических лесных пожаров 2021 г. в Республике Саха (Якутия) и ряде других субъектов Сибири и Дальнего Востока. Целью данного исследования является имитационное моделирование процесса проникновения семян в почву гарей вырубок при использовании высевачного аппарата, наиболее подходящего для конкретно заданной технологии — рядный высеv дражированных семян с заглублением в поверхностный почвенный слой. Применение дражированных семян позволяет повысить грунтовую всхожесть и сохранность всходов, снизить расход семян, производить точечный посев и обеспечивает получение высококачественных сеянцев. Высевание дражированных семян помогает решить такую проблему, как заболеваемость и гибель при неблагоприятных почвенно-климатических условиях. При введении дополнительных добавок можно ускорить прорастание семян и улучшить рост сеянцев. Дражирование также позволяет обеспечить более точный высеv семян с соблюдением расстояний между ними. Для исследования возможности проникновения дражированных семян в поверхностный почвенный слой при аэросеве было проведено имитационное моделирование методом дискретных элементов (DEM). Исследовался процесс ударного взаимодействия семян сферической формы с почвенной средой различной степени связности при различных скоростях полета семени. Исследования подтвердили возможность стабильного заглубления дражированных семян, получивших дополнительное ускорение, в поверхность несвязных и среднесвязных почв.

Авторы выражают глубокую признательность коллегам по научной школе «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» за ценные сведения и замечания, высказанные при подготовке данной работы.

Ключевые слова: лесовосстановление; восстановление леса посевом; лесное хозяйство; семена лесных растений; высевачный аппарат; беспилотный летательный аппарат.

Modeling the interaction of tree seeds with soil during aerial seeding

M.N. Lysych^{1а}, D.L. Bukhtoyarov^{1b}, O.I. Grin'ko^{2с}, O.I. Grigorjeva^{3d}, I.V. Grigorjev^{4е}, V.A. Ivanov^{2f}

¹ Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov; 8, Timiryazev St., Voronezh, Russia

² Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

³ St. Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov; 5, Institutsky Per., St. Petersburg, Russia

⁴ Arctic State Agrotechnological University; 3, Sergelyakhskoe Shosse, Yakutsk, Republic of Sakha, Russia

^а miklynea@yandex.ru, ^б vglta-mlx@yandex.ru, ^с goi2@yandex.ru ^д grigoreva_o@list.ru,

^е silver73@inbox.ru, ^ф ivanovva55@mail.ru

^а <https://orcid.org/0000-0002-3764-3873>, ^б <https://orcid.org/0000-0002-7428-0821>, ^с <https://orcid.org/0000-0003-1011-0329>,

^д <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>, ^е <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, ^ф <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>

Received 12.01.2022, accepted 25.01.2022

Modern drones can be effectively used for aerial seeding of forests. The peculiarity of aerial seeding is the possibility of rapid reforestation at low cost, which is extremely relevant in the current situation after the catastrophic forest fires of 2021 in the Republic of Sakha (Yakutia) and several other subjects of Siberia and the Far East. The aim of this study is to simulate the process of penetration of seeds into the soil of burnt-out logging sites, using the seeding unit, the most suitable for the specified technology - in-line seeding of pelleted seeds with burial in the surface soil layer. The use of pelleted seeds allows to increase soil germination and safety of shoots, to

decrease the seeds consumption, to carry out point sowing and to provide high-quality seedlings. Sowing of pelleted seeds helps to solve such problems as morbidity and mortality under unfavorable soil and climatic conditions. When extra additives are used, seed germination can be accelerated and seedling growth can be improved. Seed pelleting also makes it possible to ensure more accurate seeding with observance of seed spacing. In order to investigate the possibility of pelleted seeds penetration into the surface soil layer during air sowing, a simulation study is carried out using the discrete element method (DEM). The process of impact interaction of spherical seeds with a soil medium of varying degrees of connectivity at different speeds of seed flight is simulated. Studies have confirmed the possibility of stable deepening of pelleted seeds, which received additional acceleration into the surface of non-cohesive and medium cohesive soils.

The authors express their deep gratitude to colleagues from the scientific school "Innovative developments in the field of logging industry and forestry" for valuable information and comments made during the preparation of this work.

Keywords: reforestation; reforestation by seeding; forestry; forest plant seeds; seeding machine; unmanned aerial vehicle.

Введение. Произошедшие летом 2021 г. катастрофические лесные пожары в Республике Саха (Якутия), а также ряде других субъектов Сибири и Дальнего Востока, не только причинили колоссальный экономический и экологический ущерб, но и остро поставили вопрос об оптимальном выборе техники и технологии для проведения лесовосстановительных работ с весны 2022 г.

Большая часть образовавшихся гарей в Республике Саха (Якутия), а также ряде других субъектов Сибири и Дальнего Востока, характеризуется большими площадями, значительным удалением от населенных пунктов и трудной доступностью с точки зрения рельефа и дорожной сети.

Чем более был удален и труднодоступен очаг пожара, тем большую площадь он успевал пройти до его локализации и тушения.

Традиционными для современного лесного хозяйства России методами обеспечить быстрое и качественное лесовосстановление на больших и труднодоступных площадях гарей невозможно и очень затратно. По прошествии ряда лет гари начнут зарастать дерниной и мелколесьем из сорных мягколиственных пород. В этой связи остро встает вопрос о выборе наиболее оптимального варианта лесовосстановления в указанных природно-производственных условиях.

Вариант восстановления лесов после рубок и пожаров, а также выращивания целевых лесонасаждений при помощи посева семян достаточно хорошо известен [1; 2].

Согласно п. 47 Приказа Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 04.12.2020 г. № 1014 «Об утверждении Правил лесовосстановления, состава проекта лесовосстановления, порядка разработки проекта лесовосстановления и внесения в него изменений», искусственное восстановление леса посевом семян допускается на лесных участках со слабым развитием травянистого покрова. На свежих паловых вырубках с супесчаными и хорошо дренированными суглинистыми почвами, на которых огонь вызвал полное прогорание лесной подстилки, возможно проведение искусственного лесовосстановления аэросевом. Оптимальное время аэросева семян хвойных пород — весна (апрель — по снежному покрову, первая и вторая декады мая — непосредственно после таяния снега). Допустимыми нормами высева семян 1-го класса сортности при аэросеве считаются: на паловых и кипрейно-паловых вырубках с обнажением поверхности почвы огнем 70–80 % — для сосны 1,0, для ели 1,2 кг; на свежих вырубках из-под зеленомош-

ных типов леса с минерализацией почвы более 40 % — для сосны 1,5, для ели 1,8 кг на га.

В условиях лесов на вечной мерзлоте, характерных для Республики Саха (Якутия), а также ряда других субъектов Сибири и Дальнего Востока, травянистый покров (дернина) развивается слабо или не развивается вовсе. Поэтому вариант аэросева для восстановления удаленных и труднодоступных гарей является для данных природно-производственных условий оптимальным.

Цель работы. В настоящей работе сделана попытка аналитического исследования ударного взаимодействия сферического дражированного семени с почвенной средой для определения возможности проникновения семени в зависимости от скорости его движения и степени связанности почвенной среды.

Материалы и методы исследования. Конструкция любого высевающего аппарата определяется свойствами посевного материала. Проанализируем основные его типы, применяемые при аэросеве. Рассмотрим сначала семена в естественном виде, без дополнительных искусственных оболочек.

По размерам семена подразделяются следующим образом:

- мелкие (ель, сосна, береза);
- средние (кедр, пихта, калина, липа);
- крупные (дуб, лещина, фундук, грецкий орех).

По форме семена бывают:

- круглые (липа, лещина, фундук, грецкий орех);
- эллипсоидные (ель, сосна, дуб, кедр);
- плоские (акация желтая) [3].

Аэросев с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) сейчас чаще выполняется семенами в искусственных оболочках (см. рис. 1). Часто они имеют правильную сферическую форму и незначительные отклонения размеров. Это облегчает работу высевающих механизмов точного высева с дополнительным пневматическим ускорением семени [4]. Подобный тип дражированных семян использован в лесных высевающих комплексах компаний *Dendra Systems*, *Flash Forest*, *DroneSeed* и *AirSeed Technologies* [5–8]. Их особенностью являются высокие требования к прочности искусственной оболочки, которая не должна разрушаться при ударном взаимодействии с почвой.

Также применяются некалиброванные лесные дражированные семена, по форме близкие к сферической, но имеющие значительный разброс в размерах. Для разбросного высева семян малого и среднего размера в сельском хозяйстве широко применяются аппараты с

распределением воздушным потоком и центробежные высевальные аппараты, например, *JetSeed* компании XAG [9], UGS-2G компании CFR-Innovations [10], T Series Spreading System 2.0 компании DJI [11] и OSA HEXA S-1 отечественной компании *Bozon Aero* [12].

Высев крупных семян может осуществляться гравитационным методом. Это высевальные комплексы проекта *Dronecoria* [13] и компании *Flash Forest* [6].

Квадратные брикетированные семена могут эффективно использоваться на склонах так как не подвержены скатыванию и имеют большую площадь контакта с почвенной поверхностью. Они, как правило имеют достаточно большие размеры и ограниченную прочность. Для высева используются гравитационные периодические открываемые механизмы, например, современные высевальные комплексы компании *DroneSeed* [7].

Для высева естественных семян могут использоваться аналогичные типы высевальных аппаратов, выбираемые в зависимости от размеров семян. Исключением являются высевальные механизмы точного высева с дополнительным пневматическим ускорением семян, которые требуют точной сферической формы посевного материала.

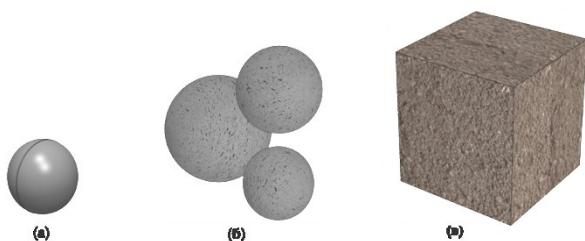


Рис. 1. Дражированные и брикетированные семена: *a* — калиброванное сферическое дражированное семя; *b* — некалиброванное сферическое или эллиптическое дражированное семя; *c* — квадратное брикетированное семя

Как известно, дражирование семян — это операция покрытия семян специальным субстратом, хорошо удерживающим влагу и содержащим достаточное количество питательных веществ, в том числе и в виде микроэлементов, стимуляторов и биопрепаратов, необходимых для быстрого прорастания семян и энергичного роста всходов [14]. Субстрат также содержит пестициды и репелленты для защиты семян и всходов от болезней и вредителей. Применение дражированных семян позволяет повысить грунтовую всхожесть и сохранность всходов, снизить расход семян, производить точечный посев и обеспечивает получение высококачественных сеянцев.

При посеве дражированных семян выращиваемых растений они оказываются в лучших условиях, чем семена сорных растений. За счет использования в качестве добавок стимуляторов роста семена лесных пород быстрее прорастают и доминируют над нежелательными травянистыми и древесными растениями.

Высев дражированных семян помогает решать такие проблемы, как заболеваемость и гибель в неблагоприятных почвенно-климатических условиях. При введении дополнительных добавок можно ускорить прорастание семян и улучшить рост сеянцев. Дражирование также позволяет обеспечить более точный посев семян с соблюдением расстояния между ними.

Химической промышленностью созданы полимерные пленки, разрушающиеся через определенное время под воздействием влаги, солнечной радиации или почвенных микроорганизмов [15; 16]. Это дает возможность перехода на посев в капсулах, которые будут содержать все необходимые элементы питания для проростка, оптимальную кислотность и механический состав микоризованного субстрата [17; 18].

Дражирование выполняется в емкостях типа бетономешалки с различным углом наклона (например, дражирователь СВА-2А) [19; 20]. Для дражирования используются торф с гуматом аммония или сапропель с поливинилацетатным клеем (до 5 % состава). Драже диаметром около 4 мм высушивают при температуре 30 °С. Следует учитывать, что дражирующая масса при насыщении водой блокирует поступление кислорода к семенам, и процесс прорастания может затянуться.

При получении дражированных семян большое значение имеет состав полимерной композиции для их покрытия. В качестве клеящего вещества для дражирования семян используют различные полимеры. Оптимальным препаратом для получения дражированных семян являются композиции, включающие полимерные связующие и целевые добавки. В качестве полимерного связующего используют мочевиноформальдегидные соединения и полифосфаты, водные растворы солей, а также поливинилацетата и др. Такое покрытие на семенах является не только источником элементов питания пролонгированного действия, но и оказывает мелиорирующее действие на почву [21; 22]. В качестве целевых добавок используют различные органоминеральные вещества, стимуляторы роста, фунгициды и микроэлементы [23; 24].

Компании, производящие семена, применяют клеящие вещества — натриевую соль карбоксиметилцеллюлозы, поливиниловый спирт, полиакриламид, бентонитовую глину или обойный клей, наполнители — сухой торф, лигнин, протравители — ТМТД (тирам).

Преимущества метода дражирования заключаются в защите семян от болезней, снижении расхода средств для химической защиты растений, удобрений и стимуляторов роста, ускорении прорастания семян. Дражированная оболочка при аэросеве служит для семян хорошей защитой от повреждений при ударе и внедрении в почвенный слой гари или вырубке. Но у этого метода подготовки семян имеются и недостатки, такие, как высокая стоимость семян. Кроме того, со временем семена теряют всхожесть, так как сквозь оболочку не поступает кислород.

Для имитационных исследований процесса взаимодействия дражированных семян с почвенным слоем на гаях использовался метод дискретных элементов (DEM).

При проведении исследований было принято решение ориентироваться на высевальный аппарат, соответствующий следующим показателям:

- возможность высева дражированных калиброванных семян сосны обыкновенной;
- необходимость заглубления в поверхностный слой;
- осуществление рядного посева с точным соблюдением схем высева.

На рис. 2 приводятся цветные эпюры центрального среза почвы, демонстрирующие процесс внедрения дражированного семени в слабосвязанный грунт при скоростях полета 25; 50 и 75 м/с.

Анализ данных показывает, что при скоростях 25 и 50 м/с глубина воронки несколько больше, чем глубина проникновения семени. Это связано с тем, что вход семени в почву происходит не вертикально вниз, а под небольшим углом из-за непрерывного движения летательного аппарата. Поэтому наблюдается незначительное продольное смещение семени вверх по стенке образованной воронки. При скорости движения 75 м/с, напротив, глубина проникновения больше, чем глубина воронки, что показывает полное засыпание семени почвой.

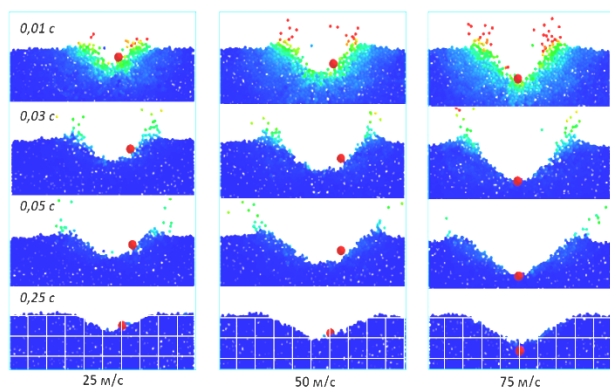


Рис. 2. Процесс ударного взаимодействия семян с несвязанными почвами

На рис. 3 приводятся результаты моделирования процесса внедрения дражированного семени в среднесвязанную почву при аналогичных скоростях полета.

Анализ данных показывает, что при скорости 25 м/с происходит выброс семени из воронки за пределы зоны моделирования во всех экспериментах. При скорости 50 м/с вероятность выброса семени снижается до 10 %. Глубина воронки при скоростях 50 и 75 м/с также несколько больше, чем глубина проникновения семени.

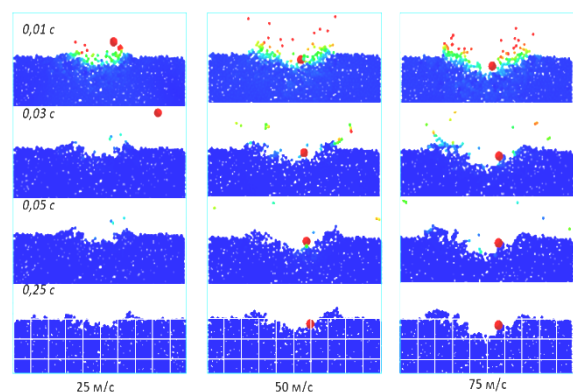


Рис. 3. Процесс ударного взаимодействия семян со среднесвязанными почвами

На рис. 4 приводятся результаты моделирования процесса внедрения дражированного семени в связную почву при аналогичных скоростях полета.

Анализ данных показывает, что при скорости 25 м/с происходит выброс семени из воронки за пределы зоны моделирования во всех экспериментах. При скорости

50 м/с вероятность выброса семени снижается до 30 %, и при 75 м/с — до 10 %. Глубина воронки при скоростях 50 и 75 м/с также несколько больше, чем глубина проникновения семени.

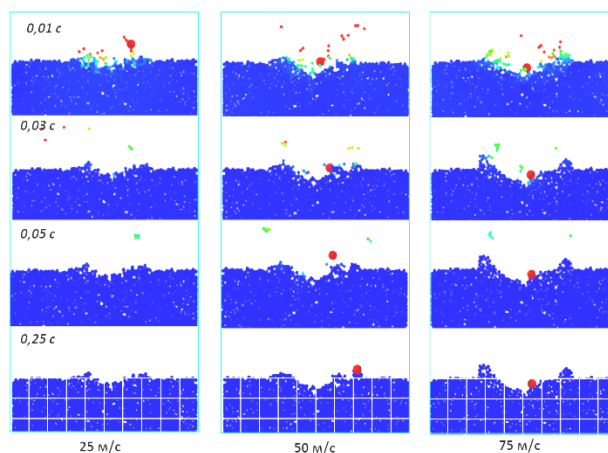


Рис. 4. Процесс внедрения дражированного семени в связанный грунт

Дополнительно на рис. 5 приводятся сводные данные о средних глубинах воронок и средних глубинах проникновения на разных типах почвы.

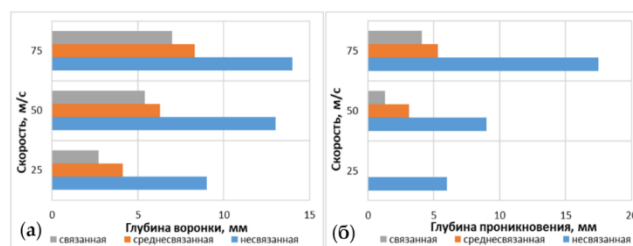


Рис. 5. Средняя глубина воронки (а) и глубина проникновения (б) дражированных семян на различных типах почвы

Выводы. Таким образом, можно рекомендовать следующие скоростные режимы работы высевальных аппаратов.

На несвязанных и слабосвязанных грунтах (песчаные почвы) достаточно скорости вхождения 50 м/с для практически 100%-ного проникновения в поверхностный слой без заметных смещений дражированного семени. Даже при скорости 25 м/с (фактически достигается при свободном падении с высоты более 30 м) наблюдается незначительное смещение практически без выноса за пределы образуемой воронки.

На среднесвязанных почвах при скорости 50 м/с не обеспечивается стабильное проникновение семени. Вероятность его выброса составляет порядка 10 %. При скорости 75 м/с обеспечивается практически 100 % проникновения в поверхностный слой без заметных смещений дражированного семени.

На связных почвах при скорости 25 м/с всегда происходит выброс семени из воронки на значительное расстояние. При скорости 50 м/с вероятность выброса семени снижается до 30 %, и при 75 м/с — до 10 %.

Также следует отметить, что проникновение в почвенный слой наблюдается только на несвязанных почвах, т. е. семя охватывается почвенными частицами с боковых сторон и сверху. В случае проникновения в

среднесвязанные и связанные почвы может наблюдаться только незначительный боковой охват семенами почвенными частицами или нахождение на поверхности, но в пределах образованного углубления.

С целью повышения достоверности модели взаимодействия посевного материала с почвенной средой в дальнейшем необходимо будет учесть углы отклонения траектории полета семян от вертикальной, возникающей при посеве с быстро движущегося беспилотного летательного аппарата. Также должны учитываться скорость вращения семен, особенно если его форма

отличается от сферической, и гранулометрический состав почв. Другой важной особенностью, требующей изучения, является возможность разрушения семян и их искусственной оболочки, что связано с их ограниченной прочностью. Кроме того, следует исследовать случаи взаимодействия со средами с неравномерными по глубине физическими свойствами. Например, наличие более прочного поверхностного слоя, наличие на поверхности лесной подстилки, растительного покрова и т. д.

Литература

1. Kunicckaya O., Tanyukevich V.V., Khmeleva D.V., Kulik A., Runova E.M., Savchenkova V., Voronova A.M., Lavrov M.F. Cultivation of the targeted forest plantations // *Journal of Environmental Treatment Techniques*. 2020. V. 8. № 4. P. 1385-1393.
2. Morkovina S.S., Kunicckaya O., Dolmatova L., Markov O., Nguyen V.L., Baranova T., Shadrina S., Grin'ko O. Comparative analysis of economic aspects of growing seedlings with closed and open root systems: the experience of Russia // *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*. 2021. V. 18. № 2. P. 19-26.
3. Давтян А.Б., Куницкая О.А., Григорьев М.Ф., Степанова Д.И. Оценка эффективности создания и эксплуатации энергетических лесных плантаций // *Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы междунар. науч.-практической конф. Воронеж, 2019. Ч. 2. С. 61-65.*
4. Давтян А.Б., Куницкая О.А., Григорьев М.Ф., Степанова Д.И., Григорьева А.И. Основы повышения эффективности систем машин для создания и эксплуатации лесных плантаций // *Актуальные проблемы лесного комплекса*. 2020. № 56. С. 19-22.
5. Рудов М.Е., Куницкая О.А., Григорьев М.Ф., Степанова Д.И., Григорьева А.И. Экологические и лесоводственные аспекты работы лесных машин в лесах криолитозоны // *Актуальные проблемы лесного комплекса*. 2020. № 57. С. 14-17.
6. Никитина Е.И., Куницкая О.А., Николаева Ф.В. Проект организации лесозаготовок в условиях алданского лесничества с применением многооперационных лесозаготовительных комплексов // *Современные проблемы и достижения аграрной науки в Арктике: сб. науч. ст. по материалам Всерос. студенческой науч.-практической конф. с междунар. участием в рамках «Северного форума - 2020» (29-30 сент. 2020 г.) и Междунар. науч. онлайн летней школы - 2020 (6-20 июля 2020 г.)*. Якутск, 2020. С. 138-148.
7. Куницкая О.А., Никитина Е.И. Экологические аспекты выборочных рубок леса // *Эколого-экономические и технологические аспекты устойчивого развития Республики Беларусь и Рос. Федерации: сб. ст. III Междунар. науч.-технической конф. «Минские науч. чтения-2020»: в 3 т. (3 дек. 2020 г.)*. Минск, 2021. С. 286-291.
8. Куницкая О.А., Никитина Е.И., Николаева Ф.В. Особенности лесозаготовки в Республике Саха Якутия // *Управление земельными ресурсами, землеустройство, кадастр, геодезия и картография. Проблемы и перспективы развития: сб. материалов Всерос. науч.-практической конф. с междунар. участием, посвящ. 255-летию Землеустройству Якутии и Году науки и технологий (26 февр. 2020 г.)*. Якутск, 2021. С. 308-313.
9. Рунова Е.М., Избинская П.Г. Особенности отвода лесосек в условиях добровольной лесной сертификации // *Актуальные проблемы лесного комплекса*. 2021. № 60. С. 68-71.
10. Grigoreva O., Runova E., Ivanov V., Alyabyev A., Hertz E., Voronova A., Shadrina S., Grigorev I. Influence of different forest management techniques on the quality of wood // *Journal of Renewable Materials*. 2021. V. 9. № 12. P. 2175-2188.
11. Рунова Е.М., Яремчук Р.И. Особенности жизнеспособности подрост в лесах Приангарья // *Актуальные проблемы лесного комплекса*. 2011. № 30. С. 48-50.
12. Рунова Е.М., Шеверда С.В. Особенности роста лесных культур сосны обыкновенной // *Актуальные проблемы лесного комплекса*. 2011. № 30. С. 46-48.
13. Рунова Е.М., Соловьёва А.А. Оценка жизненного состояния подрост сосны обыкновенной на вырубках в районе Среднего Приангарья // *Вестн. Бурятской гос. сельскохозяйственной акад. им. В.Р. Филиппова*. 2017. № 4 (49). С. 82-87.
14. Рунова Е.М., Серков Д.В. Перспективы создания смешанных лиственнично-сосновых лесных культур в Иркутской области // *Нива Поволжья*. 2017. № 4 (45). С. 126-131.
15. Рунова Е.М., Гребенюк Н.Л., Гарус И.А. Особенности лесосечных работ в лесосырьевых базах с выделенными малонарушенными территориями // *Лесотехнический журнал*. 2016. Т. 6. № 2 (22). С. 90-100.
16. Рунова Е.М., Гриценюк Т.А. Динамика лесовосстановительных процессов на древнезолотых отложениях в Кабанском районе Республики Бурятия // *Труды Братского гос. ун-та. Сер. Естественные и инженерные науки*. 2016. Т. 2. С. 107-110.
17. Морковина С.С., Драпалюк М.В., Баранова Е.В. Инновационные технологии в лесокультурном деле: реальность и перспективы // *Лесотехнический журнал*. 2015. Т. 5. № 3 (19). С. 327-338.
18. Сиволапов А.И., Сиволапов В.А., Благодарова Т.А., Морковина С.С. Перспективы создания плантационных культур быстрорастущих древесных пород биотехнологией IN VITRO в лесостепи // *Инновации и технологии в лесном хозяйстве. ИТФ-2016: тезисы докл. V Междунар. науч.-практической конф. (31 мая-2 июня 2016 г.)*. СПб., 2016. С. 128.
19. Панявина Е.А., Морковина С.С., Цепляев А.Н. Экономическая оценка инновационной технологии «pot-in-pot» для целей лесовосстановления // *Лесотехнический журнал*. 2020. Т. 10. № 3 (39). С. 185-196.
20. Морковина С.С., Сухова В.Е., Васильев О.И. Формирование системы ключевых индикаторов оценки экономических характеристик функционирования объектов инфраструктуры лесовосстановления // *Лесотехнический журнал*. 2015. Т. 5. № 2 (18). С. 215-231.

References

1. Kunicckaya O., Tanyukevich V.V., Khmeleva D.V., Kulik A., Runova E.M., Savchenkova V., Voronova A.M., Lavrov M.F. Cultivation of the targeted forest plantations // *Journal of Environmental Treatment Techniques*. 2020. V. 8. № 4. P. 1385-1393.

2. Morkovina S.S., Kunickaya O., Dolmatova L., Markov O., Nguyen V.L., Baranova T., Shadrina S., Grin'ko O. Comparative analysis of economic aspects of growing seedlings with closed and open root systems: the experience of Russia // *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*. 2021. V. 18. № 2. P. 19-26.
3. Davtyan A.B., Kunickaya O.A., Grigor'ev M.F., Stepanova D.I. Assessment of Efficiency of Creation and Operation of Energy Forest Plantations // *Energoeffektivnost' i energosberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshchestve: materialy mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. Voronezh, 2019. CH. 2. P. 61-65.*
4. Davtyan A.B., Kunickaya O.A., Grigor'ev M.F., Stepanova D.I., Grigor'eva A.I. Fundamentals of increasing the efficiency of machinery systems for the creation and operation of forest plantations // *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*. 2020. № 56. P. 19-22.
5. Rudov M.E., Kunickaya O.A., Grigor'ev M.F., Stepanova D.I., Grigor'eva A.I. Ecological and silvicultural aspects of forest machines in the cryolithozone forests // *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*. 2020. № 57. P. 14-17.
6. Nikitina E.I., Kunickaya O.A., Nikolaeva F.V. Project of logging organization in the conditions of Aldan forestry with the use of multi-operational logging complexes // *Sovremennye problemy i dostizheniya agrarnoy nauki v Arktike: sb. nauch. st. po materialam Vseros. studencheskoy nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem v ramkah «Severnogo foruma - 2020» (29-30 sent. 2020 g.) i Mezhdunar. nauch. onlajn letnej shkoly - 2020 (6-20 iyulya 2020 g.)*. YAkutsk, 2020. P. 138-148.
7. Kunickaya O.A., Nikitina E.I. Ecological aspects of selective logging // *Ekologo-ekonomicheskie i tekhnologicheskie aspekty ustojchivogo razvitiya Respubliki Belarus' i Ros. Federacii: sb. st. III Mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoy konf. «Minskie nauch. chteniya-2020»: v 3 t. (3 dek. 2020 g.)*. Minsk, 2021. P. 286-291.
8. Kunickaya O.A., Nikitina E.I., Nikolaeva F.V. Features of logging in the Republic of Sakha Yakutia // *Upravlenie zemelnymi resursami, zemleustrojstvo, kadastr, geodeziya i kartografiya. Problemy i perspektivy razvitiya: sb. materialov Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem, posvyashch. 255-letiyu Zemleustroystvu YAkutii i Godu nauki i tekhnologij (26 fevr. 2020 g.)*. YAkutsk, 2021. P. 308-313.
9. Runova E.M., Izbinskaya P.G. Peculiarities of forest cutting in conditions of voluntary forest certification // *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*. 2021. № 60. P. 68-71.
10. Grigoreva O., Runova E., Ivanov V., Alyabyev A., Hertz E., Voronova A., Shadrina S., Grigorev I. Influence of different forest management techniques on the quality of wood // *Journal of Renewable Materials*. 2021. V. 9. № 12. P. 2175-2188.
11. Runova E.M., Yaremchuk R.I. Peculiarities of the viability of young growth in the forests of the Angara region. // *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*. 2011. № 30. P. 48-50.
12. Runova E.M., Sheverda S.V. Features of growth of forest cultures of Scots pine // *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*. 2011. № 30. P. 46-48.
13. Runova E.M., Solov'yova A.A. Assessment of the vital state of the undergrowth of Scots pine in clearcuts in the Middle Angara // *Vestn. Buryatskoj gos. sel'skohozyajstvennoj akad. im. V.R. Filippova*. 2017. № 4 (49). P. 82-87.
14. Runova E.M., Serkov D.V. Prospects for creating mixed larch-pine forest cultures in the Irkutsk region // *Niva Povolzh'ya*. 2017. № 4 (45). P. 126-131.
15. Runova E.M., Grebenyuk N.L., Garus I.A. Peculiarities of logging operations in forest stands with selected intact territories // *Forestry Engineering Journal*. 2016. V. 6. № 2 (22). P. 90-100.
16. Runova E.M., Gricenyuk T.A. Dynamics of reforestation processes on ancient eolian deposits in Kabanskiy district of the Republic of Buryatia // *Trudy Bratskogo gos. un-ta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki*. 2016. V. 2. P. 107-110.
17. Morkovina S.S., Drapalyuk M.V., Baranova E.V. Innovative technologies in silviculture: reality and prospects // *Forestry Engineering Journal*. 2015. V. 5. № 3 (19). P. 327-338.
18. Sivolapov A.I., Sivolapov V.A., Blagodarova T.A., Morkovina S.S. Prospects of creation of plantation cultures of fast-growing tree species by IN VITRO biotechnology in the forest-steppe // *Innovacii i tekhnologii v lesnom hozyajstve. ITF-2016: tezisy dokl. V Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (31 maya-2 iyunya 2016 g.)*. SPb., 2016. P. 128.
19. Panyavina E.A., Morkovina S.S., Ceplyaev A.N. Economic assessment of innovative technology "pot-in-pot" for reforestation // *Forestry Engineering Journal*. 2020. V. 10. № 3 (39). P. 185-196.
20. Morkovina S.S., Suhova V.E., Vasil'ev O.I. Formation of the system of key indicators for assessing the economic performance of reforestation infrastructure // *Forestry Engineering Journal*. 2015. V. 5. № 2 (18). P. 215-231.