

14. Cuperus J.T. Single-cell genomics in plants: current state, future directions, and hurdles to overcome. *Plant Physiol.* 2021; 188:749-755.
15. Sendall, K.M., Muñoz, C.M.M., Ritter, A.D. et al. Effects of Warming and Elevated CO₂ on Stomatal Conductance and Chlorophyll Fluorescence of C3 and C4 Coastal Wetland Species. *Wetlands* 44, 43 (2024). <https://doi.org/10.1007/s13157-024-01780-0>.
16. Sazeides C.I., Christopoulou A., Fyllas N.M. Coupling photosynthetic measurements with biometric data to estimate gross primary productivity (GPP) in Mediterranean pine forests of different post-fire age. *Forests*. 2021. V. 12. №. 9. P. 1256. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12091256>.
17. Joswig J.S., Wirth C., Schuman M.C. et al. Climatic and soil factors explain the two-dimensional spectrum of global plant trait variation. *Nat Ecol Evol* 6, 36–50 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41559-021-01616-8>.
18. Kattge J. et al. TRY plant trait database – enhanced coverage and open access. *Glob. Change Biol.* 2020; 26: 119–188.
19. Beugnon R., Le Guyader N., Milcu A., Lenoir J., Puissant J., Morin X., Hättenschwiler S. Microclimate modulation: An overlooked mechanism influencing the impact of plant diversity on ecosystem functioning. *Global Change Biology*, 2024; 30: e17214. <https://doi.org/10.1111/gcb.172>.
20. Yang X., Lu M., Wang Y., Wang Y., Liu Z., Chen S. Response Mechanism of Plants to Drought Stress. *Horticulturae*. 2021; 7(3):50. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7030050>.
21. Suvorova G.G. Fotosintez khvoynykh derev'ev v usloviyakh Sibiri / G.G. Suvorova. Novosibirsk: Akademicheskoe izdatel'stvo "Geo". 2009; 195. (In Russ.). ISBN 978-5-9747-0167-2.

Сведения об авторах

✉ *Евлаков Петр Михайлович* – кандидат биол. наук, заведующий лабораторией анализа ПЦР, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0138-2410>, e-mail: peter.evlaakov@yandex.ru.

✉ *Рыжкова Владлена Сергеевна* – младший научный сотрудник лаборатории анализа ПЦР, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-9727-3088>, e-mail: vladlena.r11@yandex.ru.

Гродецкая Татьяна Александровна – научный сотрудник лаборатории анализа ПЦР, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5448-2792>, e-mail: tatyana.pokusina@yandex.ru.

Information about the authors

✉ *Peter M. Evlaakov* – PhD, Head of the Laboratory of PCR analysis, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0138-2410>, e-mail: peter.evlaakov@yandex.ru.

✉ *Vladlena S. Ryzhkova* – Junior Researcher of the Laboratory of PCR analysis, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0138-2410>, e-mail: peter.evlaakov@yandex.ru.

Tatiana A. Grodetzkaya – Researcher of the Laboratory of Biotechnologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5448-2792>, e-mail: tatyana.pokusina@yandex.ru.

✉ Для контактов/Corresponding author



Влияние аморфного кремнезема на рост семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) на рекультивируемом гранитном карьере

Анна В. Лангинова¹✉, lantinoaan@m.usfeu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4670-1879>

Наталья В. Марина¹, marinanv@m.usfeu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2641-2981>

Егор М. Агапитов^{1,2}, agapitovem@m.usfeu.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9709-1559>

Евгений В. Рогачев^{1,2}, rogachevve@m.usfeu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4964-6975>

Валерий В. Фомин^{1,2}, fominvv@m.usfeu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9211-5627>

¹Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, 37, г. Екатеринбург, 620100, Российская Федерация

²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, 620062, Российская Федерация

Восстановление техногенно-нарушенных территорий представляет одну из важнейших экологических и лесохозяйственных задач, особенно в регионах с высокой степенью антропогенного воздействия, таких как Уральский регион. В данной работе изучается возможность применения аморфного кремнезема в качестве удобрения для повышения эффективности восстановления лесных экосистем на рекультивированных землях. Аморфные формы кремнезема отличаются многофункциональностью и могут оказывать как прямое воздействие на устойчивость растений к различным видам стрессов, так и опосредованное через улучшение свойств почвы и повышение ее плодородия.

Цель исследования – оценить влияние аморфного кремнезема на рост семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) на рекультивированном гранитном карьере. Для выполнения работы были выбраны участки на учебно-опытном полигоне рекультивации нарушенных земель УГЛТУ, расположенном на Исетском гранитном карьере в Свердловской области.

Проведенный почвенный анализ показал средний уровень кислотности почв (рН 4,92±0,12), низкий уровень содержания водорастворимого калия и нитратного азота в почвах рекультивируемого участка при сравнительно повышенном содержании подвижного фосфора. Это указывает на необходимость применения удобрений и почвенных мелиорантов при создании лесных культур. В рамках исследования были проведены работы по внесению аморфного кремнезема, а также анализ его влияния на рост древесных семян.

Результаты исследования позволят расширить понимание эффективности кремниевых удобрений в условиях лесохозяйственной рекультивации, а также предлагают новые подходы к восстановлению экосистем на техногенно-нарушенных территориях.

Ключевые слова: аморфный кремнезем, рекультивация земель, гранитный карьер, сосна обыкновенная, *Pinus sylvestris* L., ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.)

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках госбюджетной темы FEUZ-2024-0011.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Влияние аморфного кремнезема на рост сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) на рекультивируемом гранитном карьере / А. В. Лантинова, Н. В. Марина, Е. М. Агапитов, В. Е. Рогачев, В. В. Фомин // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 4 (56). – С. 38–49. – Библиогр.: с. 46–48 (23 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.4/3>.

Поступила 12.09.2024. Пересмотрена 16.11.2024. Принята 17.12.2024. Опубликована онлайн 27.12.2024.

Article

Effect of amorphous silica on the growth of seedlings (*Pinus sylvestris* L.) and (*Picea obovata* Ledeb.) in a reclaimed granite quarry

Anna V. Lantinova¹✉, lantinoaan@m.usfeu.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-4670-1879>

Natalia V. Marina¹, marinanv@m.usfeu.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-2641-2981>

Egor M. Agapitov^{1,2}, agapitovem@m.usfeu.ru,  <http://orcid.org/0000-0001-9709-1559>

Evgeny V. Rogachev^{1,2}, rogachevve@m.usfeu.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-4964-6975>

Valery V. Fomin^{1,2}, fominvv@m.usfeu.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-9211-5627>

¹Ural State Forest Engineering University, 37, Sibirsky Trakt St., Yekaterinburg, 620100, Russian Federation

²Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 19, Mira St., Yekaterinburg, 620062, Russian Federation

Abstract

The restoration of technogenically-disturbed territories represents one of the most critical ecological and forestry challenges, particularly in regions with a high degree of anthropogenic impact, such as the Ural region. This study explores the possibility of using amorphous silica as a fertilizer to increase the efficiency of forest ecosystem recovery on reclaimed lands. Amorphous forms of silica exhibit multifunctionality and can exert both direct impacts on plant resilience to various stresses and indirect influences by improving soil properties and enhancing its fertility.

The objective of this investigation is to evaluate the effect of amorphous silica on the growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Siberian spruce (*Picea obovata* Ledeb.) seedlings in a reclaimed granite quarry. To accomplish this, sites were chosen within the educational-experimental polygon for land reclamation of disturbed lands at the Ural State Forest Engineering University, situated at the Isetsk granite quarry in the Sverdlovsk region.

The soil analysis revealed a moderate soil acidity level (pH 4.92±0.12) and low concentrations of water-soluble potassium and nitrate nitrogen in the soils of the reclaimed site, along with a relatively elevated content of available phosphorus. These findings suggest the need for applying fertilizers and soil amendments during the establishment of forest plantations. As part of the study, works were carried out on the application of amorphous silica, as well as an analysis of its effect on the growth of tree seedlings.

The findings from this research will broaden our comprehension of the efficacy of silicon-based fertilizers under forestry reclamation conditions and propose novel strategies for restoring ecosystems in technogenically disturbed areas.

Keywords: amorphous silica, land reclamation, granite quarry, *Pinus sylvestris* L., Scots pine, *Picea obovata* Ledeb. Siberian spruce

Funding: The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state budget topic «FEUZ-2024-0011».

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their contribution to the peer review.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Lantinova A. V., Marina N. V., Agapitov E. M., Rogachev V. E., Fomin V. V. (2024). Effect of amorphous silica on the growth of seedlings (*Pinus sylvestris* L.) and (*Picea obovata* Ledeb.) in a reclaimed granite quarry. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No.4 (56), pp. 38-49 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.4/3>.

Received 12.09.2024. **Revised** 16.11.2024. **Accepted** 17.12.2024. **Published online** 27.12.2024.

Введение

Аморфный кремнезем является одним из перспективных материалов в агрохимии и лесном хозяйстве благодаря своей многофункциональности, влиянию на рост растений и улучшению качества почв. За последние десятилетия исследователи все больше концентрируются на возможностях использования кремниевых препаратов для повышения устойчивости растений к различным стрессовым факторам и улучшения их продуктивности. Тем не менее, влияние аморфного кремнезема на древесные виды, такие как сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) и ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.), изучено недостаточно, что делает данное направление особенно актуальным.

Кремний является элементом, присутствующим в большинстве типов почв, хотя и не считается жизненно важным для растений. Однако накопленные исследования показывают, что его введение в почву или использование в качестве удобрения может значительно повысить устойчивость растений к биотическим и абиотическим стрессам, таким как засуха, солевой стресс, повреждения вредителями и заболевания [1-4].

Кремний (Si) является вторым по распространенности элементом в земной коре, и его содержание в растениях колеблется от 0,1% до 10% в зависимости от вида. Хотя до сих пор не доказано, что Si является незаменимым элементом для растений, он широко признан как полезный фактор роста и развития растений. Si может смягчать биотические стрессы, такие как патогены растений и насекомые-вредители, а также абиотические стрессы, такие как засуха, жара, холод, полегание, засоление, ультрафиолетовое излучение, токсичность металлов и дисбаланс питательных веществ. Si может повысить устойчивость растений к абиотическим и биотическим стрессам с помощью физических и физиолого-

биохимических механизмов. Недавно несколько авторов провели систематический обзор прогресса исследований по выяснению механизмов опосредованного Si ослабления биотических и абиотических стрессов у растений [4-6; 7-9]. Однако в этих обзорах положительному влиянию Si на дисбаланс питательных веществ уделялось относительно мало внимания.

Аморфный кремнезем, как одна из биоактивных форм кремния, обладает высокой растворимостью, что делает его доступным для растений и способствует интенсивному включению элемента в их обменные процессы [2].

Исследования, направленные на изучение влияния кремния на рост деревьев, в частности хвойных, гораздо менее многочисленны, чем работы, посвященные сельскохозяйственным растениям. Однако уже есть данные, свидетельствующие о его положительном воздействии на рост и устойчивость деревьев. Например, работы ряда авторов показали, что внесение кремниевых удобрений способствует увеличению биомассы хвои и повышению ее устойчивости к воздействию низкотемпературных стрессов. Исследования выявили, что обработка посадочного материала сосны кремниевыми соединениями снижает потери от заболеваний корней и повышает всхожесть семян [10, 11].

Аморфный кремнезем оказывает как прямое, так и опосредованное воздействие на растения. Прямое влияние связано с повышением активности фотосинтетических процессов, увеличением содержания пигментов и улучшением водного обмена. Кроме того, кремний способствует укреплению клеточных стенок, что улучшает механическую устойчивость растений и их защиту от болезней и повреждений [12, 13].

Опосредованное влияние аморфного кремнезема проявляется через улучшение свойств почвы, включая повышение ее структурности, уменьшение

кислотности и обогащение доступными элементами питания. Для техногенно нарушенных почв, на которых осуществляется рекультивация, особенно важно восстановление плодородия, что делает аморфный кремнезем ценным компонентом почвенных мелиорантов [13, 14].

Участки, подвергшиеся техногенному воздействию, такие как гранитные карьеры, характеризуются крайне низкой обеспеченностью питательными элементами, высоким уровнем кислотности и деградацией почвы. В условиях подобных территорий внесение кремниевых препаратов может служить эффективным инструментом для улучшения условий роста лесных культур. Так, например, кремниевые соединения способствуют восстановлению гумусированного горизонта и стимулируют развитие корневых систем молодых растений [15-19].

Для сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) использование аморфного кремнезема позволяет оптимизировать процесс фотосинтеза, усилить рост побегов и стабилизировать уровень влагоснабжения растений, что особенно важно для лесных культур в аридных и техногенно нарушенных условиях. Это даёт возможность значительно повысить приживаемость и устойчивость хвойных деревьев на сложных почвах с низким природным плодородием, таких как почвы гранитных карьеров.

Таким образом, исследования демонстрируют большой потенциал использования аморфного кремнезема в лесном хозяйстве, особенно в области восстановления экосистем на нарушенных территориях. Однако до сих пор недостаточно изучено долгосрочное влияние кремниевых препаратов на древесные породы, такие как сосна обыкновенная и ель сибирская. Будущие исследования должны быть направлены на уточнение дозировки, методов внесения и сочетания аморфного кремнезема с другими почвенными мелиорантами для максимального повышения продуктивности лесных культур.

В Уральском регионе, одном из наиболее промышленно развитых территорий России, накопились обширные участки нарушенных земель, сформировавшихся в результате интенсивной хозяйственной деятельности, включая добычу полезных

ископаемых, строительство и другие виды техногенного воздействия [20, 21]. Эти земельные ресурсы отличаются деградированным состоянием почв, утратой плодородного слоя и разрушением экосистем, что требует их целенаправленной рекультивации для восстановления экологического баланса и последующего хозяйственного использования.

Среди различных методов и подходов к рекультивации наиболее распространенным и обоснованным считается лесохозяйственное направление [22, 23]. Оно предусматривает создание устойчивых лесонасаждений, которые выполняют функции восстановления экологической стабильности, регуляции микроклимата и формирования почвенного покрова. Лесохозяйственная рекультивация особенно актуальна для техногенно нарушенных территорий в силу их малой пригодности для сельскохозяйственного использования, а также способности лесных культур эффективно стабилизировать экосистему, предотвращая дальнейшие процессы деградации.

Выбор в пользу лесохозяйственного подхода также обусловлен его многофункциональностью. Залесение нарушенных земель способствует пресечению водной и ветровой эрозии почв, улучшению водного режима, увеличению биоресурсного потенциала региона и создает возможность долгосрочного использования восстановленных территорий для нужд лесного хозяйства. Кроме того, формирование лесных экосистем на рекультивируемых землях способствует повышению биоразнообразия и восстановлению природных экосистем, что имеет важное значение для сохранения уникальных природных комплексов Уральского региона.

Учитывая масштабы и специфику загрязнений, а также климатические и почвенные условия региона, лесохозяйственное направление рекультивации является наиболее перспективным и требует дальнейшего научного обоснования и разработки технологий, адаптированных к условиям Урала. Однако применение кремниевых препаратов до сих пор является нетрадиционным, и они используются весьма ограничено. В научной литературе представлено относительно мало материала об исследованиях влияния кремния, по сравнению с оценками

роли других элементов минерального питания. Эффективность применения аморфного кремнезема в лесном хозяйстве изучена недостаточно.

Цель работы – исследование возможности использования аморфного кремнезема в качестве удобрения и его влияние на рост сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) на рекультивируемом гранитном карьере.

Материалы и методы

Объектом исследования являются участки лесных культур сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) на рекультивированной части Исетского гранитного карьера на учебно-опытном полигоне рекультивации нарушенных земель УГЛТУ (рис. 1). Исетский гранитный карьер находится в Верхнепышминском районе Свердловской области. Согласно схеме лесорастительного районирования (Колесников и др., 1974), относится к южно-таежному округу Зауральской холмисто-предгорной провинции Западно-Сибирской равнинной лесорастительной области.



Рисунок 1. Расположение саженцев на Исетском гранитном карьере

Figure 1. Location of test areas at the Iset granite quarry

Технический этап рекультивации рекультивируемого участка, заключающийся в отсыпке дна гранитного карьера вскрышной породой проводился в несколько этапов осенью 2022 года, весной и осенью 2023 года. Глубина отсыпки на разных участках полигона варьирует от 0,2 до 1,5 м [23].

Проведенный почвенный анализ содержания элементов минерального питания показал, что обеспеченность водорастворимым калием и нитратным

азотом характеризуется очень низким уровнем, а подвижным фосфором повышенным. Величина pH водной вытяжки почво-грунтов исследуемых участков карьера ($4,92 \pm 0,12$) показывает их среднюю кислотность. Что говорит о необходимости внесения удобрений/почвенных мелиорантов при посадке.

Биологический этап рекультивации исследуемого участка проводился в несколько этапов весной и осенью 2023 года. Высаживались 2-летние сеянцы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) с открытой корневой системой и 4-х летние сеянцы ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) с открытой корневой системой. В качестве кремниевого удобрения был использован аморфный кремнезем, в виде минерала опала состава $SiO_2 \cdot nH_2O$, полученный в заводских условиях ООО «Ультра Си» по ТУ 20.13.24-005-50721851-2017. Аморфный кремнезем вносился в дозе 0,2 г. на растение в посадочную щель. Подробное описание вариантов опыта приведено в табл. 1. Для посадки растений использовался меч Колесова либо лопата. Агротехнические уходы заключались в поливе и в ручной прополке сорняков, их целесообразность определялась исходя из погодных условий и интенсивности зарастания травянистой растительностью.

Таблица 1

Условия создания и характеристика лесных культур на рекультивированном участке

Table 1
Conditions for the creation and characteristics of forest crops in the reclaimed area

Но- мер ряда Num	По- рода, Spe- cies	Тип корне- вой си- стемы Type of root system	Внесе- ние удобре- ний Appli- cation of fertiliz- ers	Дата по- садки Date	Количе- ство по- сажен- ных се- янцев, шт. The number of seed- lings planted, pcs.
7	Е	ОКС	Нет	27.04	29
10	Е	ОКС	АК	27.04	29
19	Е	ОКС	Нет	27.04	41
21	Е	ОКС	АК	27.04	41
23	С	ОКС	Нет	11.05	33
25	С	ОКС	АК	11.05	30
27	С	ОКС	Нет	11.05	28
29	С	ОКС	АК	11.05	41
31	С	ОКС	Нет	11.05	50
32	С	ОКС	АК	11.05	40

Примечание: АК – аморфный кремнезем

После посадки, а также в начале и конце вегетационного периода проводились измерения высоты стволика с точностью до 0,5 см, величины годового прироста, диаметра проекции кроны в двух изменениях, диаметра шейки корня. Учитывали состояние сеянцев сосны и ели, в том числе отмечали причину гибели - подтопление, провал грунта, угнетение травянистой растительностью и мягколиственными породами, а также различные антропогенные повреждения, такие как затаптывание, гибель по причине наезда техники и тд.

Измерения диаметра шейки корня проводили цифровым штангенциркулем ABS NORGAU Industrial, NCD-15AD, разрешение 0,01мм/0,0005'', диапазон измерений 0-150 мм, номер в Госреестре 61563-15. Измерения высоты, диаметра проекции кроны в двух изменениях проводили с помощью металлической измерительной рулетки.

Расчёт эффекта влияния внесения аморфного кремнезема при посадке на рост и развитие саженцев *Pinus sylvestris* и *Picea obovata* проводили по эффекту влияния оцениваемого фактора (ИТФ) по формуле

$$ИТФ = \frac{T\Phi_o}{T\Phi_k}$$

где TΦo – значение оцениваемого показателя в опыте;

TΦk – значение оцениваемого показателя в контроле.

Эффект воздействия определяли по аналогии со шкалой Кабирова и Багдасаряна [8, 9]

Анализ данных проводился посредством программного обеспечения R 4.4.2. Сравнение двух групп с использованием непараметрического теста Манна-Уитни для двух независимых выборок. Для использования данного теста нет требований к принадлежности к нормальному распределению значений параметров сравниваемых выборок. Достоверность различий показателей оценивали по значению p-value при статистической значимости 0.05.

Результаты

Осенью в первый год после посадки, а также весной следующего года провели учет приживаемости саженцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) и ели сибирской (*Picea obovata*), осенью 2024 года оценили сохранность (табл. 2).

Таблица 2

Приживаемость и сохранность сеянцев по состоянию на 15.06.2023 г. и 20.09.2024 г.

Table 2

Survival and preservation of seedlings as of 06/15/2023 and 09/20/2024

Но- мер ряд а Nu m	По- рода Spe- cies	Внесе- ние удоб- рений Appli- cation of ferti- lizers	Прижива- емость, % Survival, %	Сохран- ность, %, Preservatio n, %
			15.09.2023	20.09.2024
7	Е	Нет	79,31	79,31
10	Е	АК	89,65	89,65
19	Е	Нет	87,80	80,49
21	Е	АК	78	75,61
23	С	Нет	93,94	87,87
25	С	АК	96,67	93,33
27	С	Нет	100	100
29	С	АК	96,24	95,80
31	С	Нет	92	92
32	С	АК	100	92,5

Измерения высоты стволика проводились сразу после посадки, в начале и конце вегетационного периода (рис. 2, 3).

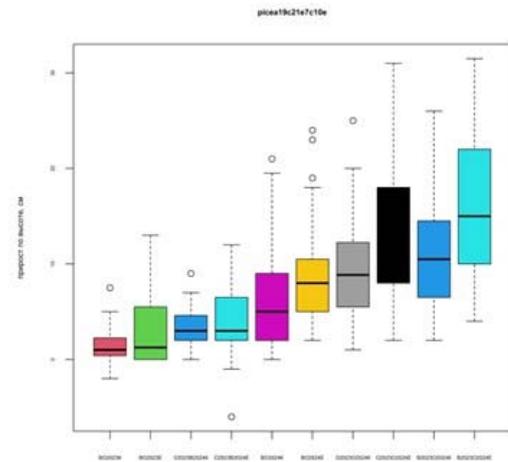


Рисунок 2. График прироста по высоте для ели сибирской (*Picea obovata*): В-весна, О- осень, К-контроль, Е-опыт
Figure 2. Height growth chart for Siberian spruce (*Picea obovata*): В-spring, О- autumn, К-control, Е-experiment

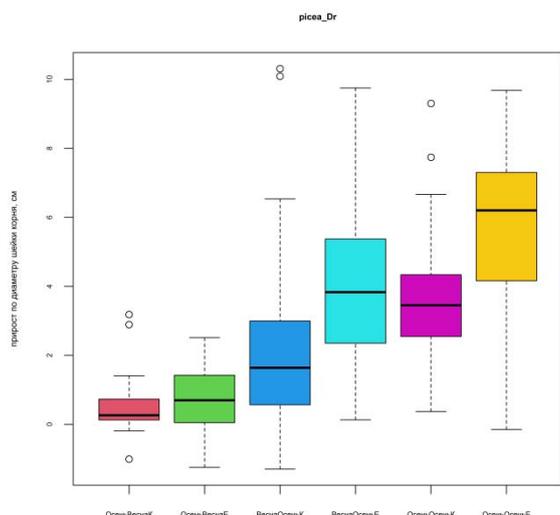


Рисунок 3. График прироста по диаметру шейки корня для ели сибирской (*Picea obovata*): В-весна, О-осень, К-контроль, Е-опыт
 Figure 3. Graph of growth by root collar diameter for Siberian spruce (*Picea obovata*): В-spring, О-autumn, К-control, Е-experiment

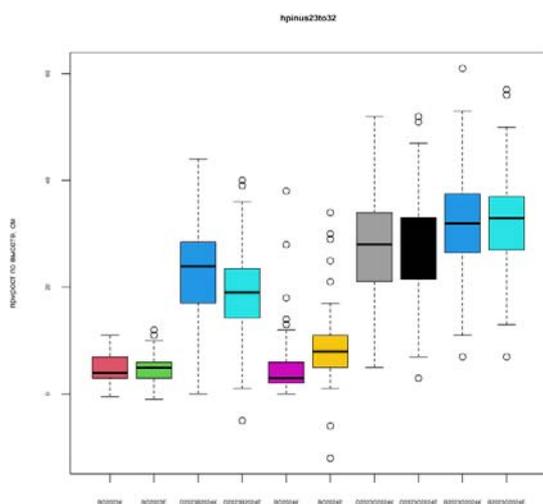


Рисунок 4. График прироста по высоте для сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*): В-весна, О-осень, К-контроль, Е-опыт
 Figure 4. Graph of height increase for Scots pine (*Pinus sylvestris*): В-spring, О-autumn, К-control, Е-experiment

Особенности рекультивируемого участка, в том числе неоднородность микрорельефа нашли свое отражение в приживаемости и сохранности лесных культур.

Приживаемость *Picea obovata* более низкая, что объясняется биологическими особенностями данной породы. В отличие от сосны обыкновенной ель сибирская предпочитает почвы среднего плодородия, тогда как *Pinus sylvestris* произрастает и на очень бедных почвах. Кроме того, *Picea obovata* очень чувствительна к переизбытку влаги в почве и это объясняет низкую сохранность саженцев в 21 ряду, этот ряд располагается наиболее близко к водоему и подвержен подтоплению. При этом, на участке без застойного увлажнения внесение аморфного кремнезема при посадке, привело к увеличению приживаемости на 10%. Эффект влияния внесения аморфного кремнезема при посадке составил 1,13, что соответствует VI классу шкалы Кабирова и Багдасаряна и говорит о среднем стимулирующем эффекте.

Приживаемость сосны обыкновенной составила 100-92 %, в контрольном варианте и 100-96 % в эксперименте. Сохранность у сосны в контрольном варианте на 6 % ниже, чем в эксперименте. Эффект влияния внесения аморфного кремнезема на приживаемость ели сибирской составил 1,02, что соответствует V классу (норма) шкалы Кабирова и Багдасаряна и говорит, что фактор не оказывает существенного влияния на рост и развитие сеянцев.

Обработка результатов эксперимента показала, что нет существенных отличий приростов ели сибирской по высоте в первый год эксперимента (с весны по осень 2023г.) $p\text{-value} = 0.2103$ и с осени 2023г. по весну 2024г. $p\text{-value} = 0.338$).

Прирост по высоте на второй год эксперимента с весны 2024 по осень 2024 составил в контрольном варианте 7,5 см, в эксперименте -8 см, $p\text{-value} = 0.002759$. Эффект влияния внесения аморфного кремнезема при посадке составил 1,07 (норма).

Прирост по высоте с осени 2023 г до осени 2024 в контрольном варианте составил 10,5 см, в эксперименте – 12 см., $p\text{-value} = 0.00163$. Выборки достоверно отличаются на уровне значимости менее

0.05. Эффект влияния внесения аморфного кремнезема при посадке составил 1,14 (средняя стимуляция).

Прирост по высоте с момента посадки 2023 г. до осени 2024 г. контрольном варианте составил 12,5 см, в эксперименте – 16,5 см. Эффект влияния внесения аморфного кремнезема при посадке составил 1,32 (средняя стимуляция).

Аналогичные данные получены по приросту диаметра шейки корня *Picea obovata*. Прирост по диаметру шейки корня с даты посадки до осени 2024 г. контрольном варианте составил 2,31 мм, в эксперименте – 3,97 см. Эффект влияния внесения аморфного кремнезема при посадке составил 1,71, что свидетельствует о выраженной стимуляции.

В отличие от ели сибирской достоверных различий для приростов по высоте сосны обыкновенной выявлено не было. К почвенным условиям сосна не требовательна и может расти на очень бедных субстратах, на очень мелких горных почвах, что в свою очередь позволяет рекомендовать сосну обыкновенную в качестве главной древесной породы при создании карбоновых ферм на нарушенных землях [4].

В соответствии с полученными результатами можно сделать предварительный вывод о положительном влиянии аморфного кремнезема на рост хвойных растений и устойчивость к неблагоприятным условиям окружающей среды. Так, зимний период 2023-2024 гг. характеризовался минимальной высотой снежного покрова. Летом 2023 года максимальная температура воздуха составила +40 °С и сопровождалось засухой. Южная часть полигона наиболее сильно заросла травянистой растительностью, в центральной же части полигона травянистая растительность развилась слабо, что в свою очередь может быть следствием уплотнения грунта грузовой техникой.

Заключение

1. В результате проведенного исследования установлено, что применение аморфного кремне-

зема в качестве удобрения оказывает положительное влияние на рост и развитие сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) на рекультивированных земельных участках Исетского гранитного карьера.

2. Аморфный кремнезем продемонстрировал эффективность как универсальное средство, повышающее устойчивость растений к стрессовым факторам техногенно нарушенных территорий. Его внесение способствует улучшению адаптационных механизмов растений и позволяет компенсировать недостаток питательных элементов в почвогрунтах с низким естественным плодородием.

3. Почвенный анализ подтвердил, что исследуемые участки характеризуются низкой обеспеченностью водорастворимым калием и нитратным азотом на фоне повышенного содержания подвижного фосфора, что обуславливает необходимость применения удобрений для создания устойчивых лесных культур. В этом контексте аморфный кремнезем может использоваться как эффективное средство для мелиорации подобных территорий.

4. Определена значимость кислотности почвогрунта ($pH\ 4,92 \pm 0,12$) как ключевого фактора, ограничивающего рост растений на данных участках. Применение аморфного кремнезема способствует улучшению химических характеристик почвы, что в свою очередь повышает продуктивность создаваемых лесных культур.

5. Данный подход открывает перспективы для использования кремниевых препаратов в лесохозяйственной практике рекультивации нарушенных земель, расширяя возможности улучшения экосистемных характеристик на техногенно-трансформированных территориях.

Предложенные в работе методы внесения и оценки эффективности кремниевых удобрений могут быть использованы для разработки технологий повышения продуктивности при восстановлении природных экосистем в условиях техногенного воздействия.

Список литературы

1. Wang M., Wang R., Mur L.A.J. et al. Functions of silicon in plant drought stress responses. *Hortic Res.* 2021; 8:254. <https://doi.org/10.1038/s41438-021-00681-1>.
2. Chen D., Wang, S. Yin L., Deng, X. How does silicon mediate plant water uptake and loss under water deficiency? *Front. Plant Sci.* 2018; 9: 281 <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00281>.
3. Lux A., Lukačová Z., Vaculík M., Švubová R. et al. Silicification of Root Tissues. *Plants.* 2020; 9(1):111. <https://doi.org/10.3390/plants9010111>.
4. Katz O., Puppe D., Kaczorek D., Prakash N.B., Schaller J. Silicon in the Soil–Plant Continuum: Intricate Feedback Mechanisms within Ecosystems. *Plants.* 2021; 10(4):652. <https://doi.org/10.3390/plants10040652>
5. Song Z., Liu C., Müller K., Yang X., Wu Y., Wang, H. Silicon regulation of soil organic carbon stabilization and its potential to mitigate climate change. *Earth-Sci. Rev.* 2018, 185, 463–475. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.06.020>.
6. Minden V., Schaller J., Olde Venterink H. Plants increase silicon content as a response to nitrogen or phosphorus limitation: a case study with *Holcus lanatus*. *Plant Soil* 462, 95–108 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04667-1>.
7. Котова В. С., Корчагин И. Е., Розинкина Е. П., Петров А. И., Осипенко Р. А., Годовалов Г. А. Определение перспективности сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) для создания карбоновых ферм // Леса России и хозяйство в них. 2023; (86):4–13. DOI: 10.51318/FRET.2023.3.86.001.
8. Полигон «Урал-Карбон» (Северка) / С. В. Залесов, В. В. Фомин, Е. П. Платонов, Г. А. Годовалов, К. А. Башегуров, П. Н. Сураев // Леса России и хозяйство в них. 2021; 3 (78): 4–14. DOI: 10.51318/FRET.2021.89.34.001.
9. Фомин В. В., Залесов С. В., Агапитов Е. М., Рогачев В. Е., Марина Н. В., Лантинова А. В. Научные исследования и разработки уральского государственного лесотехнического университета в области климатических проектов // Леса России и хозяйство в них. 2023; 4 (87): 4-17. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nauchnye-issledovaniya-i-razrabotki-uralskogo-gosudarstvennogo-lesotekhnicheskogo-universiteta-v-oblasti-klimaticheskikh-proektov>.
10. Turpault M.-P., Calvaruso C., Kirchen G., Redon P.-O., Cochet C. Contribution of fine tree roots to the silicon cycle in a temperate forest ecosystem developed on three soil types. *Biogeosciences* 2018, 15, 2231–2249.
11. Sharma B., Kumawat K.C., Tiwari S., Kumar A., Dar R.A., Singh U., Cardinale M. Silicon and plant nutrition: Dynamics, mechanisms of transport, and role of silicon solubilizer microbiomes in sustainable agriculture. *Pedosphere* 2023; 33 (4): 534-555. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.11.004>.
12. Coskun D., Britto D.T., Huynh W.Q., Kronzucker H.J. (2016) The Role of Silicon in Higher Plants under Salinity and Drought Stress. *Front. Plant Sci.* 7:1072. doi: 10.3389/fpls.2016.01072.
13. Khan A., Khan A.L., Muneer S., Kim Y.-H., Al-Rawahi A., Al-Harrasi A. (2019) Silicon and Salinity: Crosstalk in Crop-Mediated Stress Tolerance Mechanisms. *Front. Plant Sci.* 10:1429. doi: 10.3389/fpls.2019.01429.
14. Yan G.-C., Nikolic M., Ye M.-J., Xiao Z.-X., Liang Y.-C. (2018). Silicon acquisition and accumulation in plant and its significance for agriculture. *J. Integr. Agric.* 17, 2138–2150. doi: 10.1016/S2095-3119(18)62037-4.
15. Nzereogu P.U., Omah A.D., Ezema F.I., Iwuoha E.I., Nwanya A.C. Silica extraction from rice husk: Comprehensive review and applications. *Hybrid Advances*, 2023; 4: 100111, <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2023.100111>.
16. Mahawar L., Ramasamy K. P., Suhel M. et al. Silicon nanoparticles: Comprehensive review on biogenic synthesis and applications in agriculture. *Environmental Research.* 2023; 232: 116292. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116292>.

17. Oszako T., Kowalczyk K., Zalewska W., Kukina O., Nowakowska J. A., Rutkiewicz A., Bakier S., Borowik P. (2023). Feasibility of Using a Silicon Preparation to Promote Growth of Forest Seedlings: Application to Pine (*Pinus sylvestris*) and Oak (*Quercus robur*). *Forests*, 14(3), 577. <https://doi.org/10.3390/f14030577>.
18. Sharma B., Kumawat K.C., Tiwari S., Kumar A., Dar R.A., Singh U., Cardinale M. Silicon and plant nutrition: Dynamics, mechanisms of transport, and role of silicon solubilizer microbiomes in sustainable agriculture. *Pedosphere* 2023; 33 (4): 534-555. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.11.004>.
19. Shivaraj S., Mandlik R., Bhat J.A., Raturi G. et al. Outstanding questions on the beneficial role of silicon in crop plants. *Plant Cell Physiol.* 2022; 63: 4–18. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcab145>.
20. Осипенко А. Е., Залесов С. В., Данилов И. А., Лантинова А.В. Приживаемость лесных культур на учебно-опытном полигоне рекультивации нарушенных земель // Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: Материалы XV Международной научно-технической конференции, Екатеринбург, 08 февраля 2024 года. – Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2024. – С. 228-232. – EDN VVZSKD. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=65349968>.
21. Павленко Д. И., Малая М. С., Башегуров К. А., Осипенко Р. А., Белов Л. А. Эффективность лесохозяйственного направления рекультивации песчаных карьеров / Леса России и хозяйство в них. 2022; 2 (81): 19–26.
22. Залесов С. В., Зарипов Ю. В., Осипенко Р. А. Опыт лесохозяйственного направления рекультивации нарушенных земель при разработке месторождений глины, хризотил-асбеста и редкоземельных руд. Екатеринбург : Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2022. 282 с.
23. Бачурина А. В., Залесов С. В., Толкач О. В. Эффективность лесной рекультивации нарушенных земель в зоне влияния медеплавильного производства // Экология и промышленность России. 2020; 24 (6): 67–71. DOI: 10.18412-1816-0395-2020-6-67-71.

References

1. Wang M., Wang R., Mur L.A.J. et al. Functions of silicon in plant drought stress responses. *Hortic Res.* 2021; 8:254. <https://doi.org/10.1038/s41438-021-00681-1>.
2. Chen D., Wang, S. Yin L., Deng, X. How does silicon mediate plant water uptake and loss under water deficiency? *Front. Plant Sci.* 2018; 9: 281 <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00281>.
3. Lux A., Lukačová Z., Vaculík M., Švubová R. et al. Silicification of Root Tissues. *Plants.* 2020; 9(1):111. <https://doi.org/10.3390/plants9010111>.
4. Katz O., Puppe D., Kaczorek D., Prakash N.B., Schaller J. Silicon in the Soil–Plant Continuum: Intricate Feedback Mechanisms within Ecosystems. *Plants.* 2021; 10(4):652. <https://doi.org/10.3390/plants10040652>
5. Song Z., Liu C., Müller K., Yang X., Wu Y., Wang, H. Silicon regulation of soil organic carbon stabilization and its potential to mitigate climate change. *Earth-Sci. Rev.* 2018, 185, 463–475. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.06.020>.
6. Minden V., Schaller J., Olde Venterink H. Plants increase silicon content as a response to nitrogen or phosphorus limitation: a case study with *Holcus lanatus*. *Plant Soil* 462, 95–108 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04667-1>.
7. Kotova V. S., Korchagin I. E., Rozinkina E. P., Petrov A. I., Osipenko R. A., Godovalov G. A. Determining the prospects of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) for creating carbon farms. *Forests of Russia and agriculture in them.* 2023; 3 (86): 4-13. DOI: 10.51318/FRET.2023.3.86.001.
8. The Ural-Carbon landfill (Severka) / S. V. Zalesov, V. V. Fomin, E. P. Platonov, G. A. Godovalov, K. A. Bashegurov, P. N. Suraev. *Forests of Russia and their management.* 2021; 3 (78): 4-14. DOI: 10.51318/FRET.2021.89.34.001.

9. Fomin V.V., Zalesov S.V., Agapitov E.M., Rogachev V.E., Marina N.V., Lantinova A.V. Scientific research and development of the Ural State Forestry Engineering University in the field of climate projects. Forests of Russia and agriculture in them. 2023; 4 (87): 4-17. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nauchnye-issledovaniya-i-razrabotki-uralskogo-gosudarstvennogo-lesotekhnicheskogo-universiteta-v-oblasti-klimaticheskikh-proektov>.
10. Turpault M.-P., Calvaruso C., Kirchen G., Redon P.-O., Cochet C. Contribution of fine tree roots to the silicon cycle in a temperate forest ecosystem developed on three soil types. Biogeosciences 2018, 15, 2231–2249.
11. Sharma B., Kumawat K.C., Tiwari S., Kumar A., Dar R.A., Singh U., Cardinale M. Silicon and plant nutrition: Dynamics, mechanisms of transport, and role of silicon solubilizer microbiomes in sustainable agriculture. Pedosphere 2023; 33 (4): 534-555. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.11.004>.
12. Coskun D., Britto D.T., Huynh W.Q., Kronzucker H.J. (2016) The Role of Silicon in Higher Plants under Salinity and Drought Stress. Front. Plant Sci. 7:1072. doi: 10.3389/fpls.2016.01072.
13. Khan A., Khan A.L., Muneer S., Kim Y.-H., Al-Rawahi A., Al-Harrasi A. (2019) Silicon and Salinity: Crosstalk in Crop-Mediated Stress Tolerance Mechanisms. Front. Plant Sci. 10:1429. doi: 10.3389/fpls.2019.01429.
14. Yan G.-C., Nikolic M., Ye M.-J., Xiao Z.-X., Liang Y.-C. (2018). Silicon acquisition and accumulation in plant and its significance for agriculture. J. Integr. Agric. 17, 2138–2150. doi: 10.1016/S2095-3119(18)62037-4.
15. Nzereogu P.U., Omah A.D., Ezema F.I., Iwuoha E.I., Nwanya A.C. Silica extraction from rice husk: Comprehensive review and applications. Hybrid Advances, 2023; 4: 100111, <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2023.100111>.
16. Mahawar L., Ramasamy K. P., Suhel M. et al. Silicon nanoparticles: Comprehensive review on biogenic synthesis and applications in agriculture. Environmental Research. 2023; 232: 116292. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116292>.
17. Oszako T., Kowalczyk K., Zalewska W., Kukina O., Nowakowska J. A., Rutkiewicz A., Bakier S., Borowik P. (2023). Feasibility of Using a Silicon Preparation to Promote Growth of Forest Seedlings: Application to Pine (*Pinus sylvestris*) and Oak (*Quercus robur*). Forests, 14(3), 577. <https://doi.org/10.3390/f14030577>.
18. Sharma B., Kumawat K.C., Tiwari S., Kumar A., Dar R.A., Singh U., Cardinale M. Silicon and plant nutrition: Dynamics, mechanisms of transport, and role of silicon solubilizer microbiomes in sustainable agriculture. Pedosphere 2023; 33 (4): 534-555. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.11.004>.
19. Shivaraj S., Mandlik R., Bhat J.A., Raturi G. et al. Outstanding questions on the beneficial role of silicon in crop plants. Plant Cell Physiol. 2022; 63: 4–18. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcab145>.
20. Osipenko A. E., Zalesov S. V., Danilov I. A., Lantinova A.V. Survival of forest crops at the educational and experimental site of reclamation of disturbed lands // Effective response to modern challenges taking into account the interaction of man and nature, man and technology: Proceedings of the XV International Scientific and Technical Conference, Yekaterinburg, February 08, 2024 of the year. Yekaterinburg: Ural State Forestry Engineering University, 2024. 228-232. EDN VVZSKD. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=65349968>.
21. Pavlenko D. I., Malaya M. S., Bashegurov K. A., Osipenko R. A., Belov L. A. Efficiency of forestry direction of recultivation of sand pits. Forests of Russia and agriculture in them. 2022; 2 (81): 19-26.
22. Zalesov S.V., Zaripov Yu. V., Osipenko R. A. Experience of forestry reclamation of disturbed lands in the development of deposits of clay, chrysotile asbestos and rare earth ores. Yekaterinburg: Ural State Forestry Engineering Univ., 2022. 282 p.
23. Bachurina A.V., Zalesov S. V., Tolkach O. V. Efficiency of forest reclamation of disturbed lands in the zone of influence of copper smelting. Ecology and industry of Russia. 2020; 24 (6): 67-71. DOI: 10.18412-1816-0395-2020-6-67-71.