



БИОЛОГИЯ

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2024. Т. 24, вып. 3. С. 292–301
Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology, 2024, vol. 24, iss. 3, pp. 292–301
<https://ichbe.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2024-24-3-292-301>
EDN: SPSUSY

Научная статья
УДК 574.4+502.5

Плотность всходов сосны обыкновенной в сосновых лесах под влиянием выбросов Карабашского медеплавильного комбината и лесных пожаров

Н. Б. Куянцева¹✉, А. Г. Мумбер¹, Д. А. Молчанова², Д. В. Веселкин²

¹Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Россия, 456317, г. Миасс, Ильменский государственный заповедник

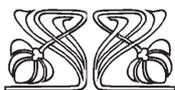
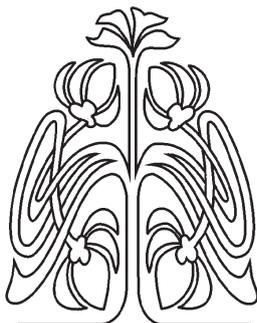
²Институт экологии растений и животных УрО РАН, Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 202

Куянцева Надежда Борисовна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник биологического отдела, borisovna_k@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8746-2341>

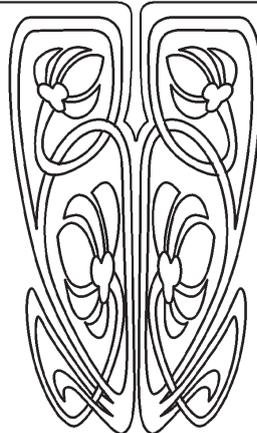
Мумбер Александр Геннадьевич, младший научный сотрудник биологического отдела, silver@mineralogy.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2345-5468>

Молчанова Дарья Александровна, младший научный сотрудник лаборатории геоинформационных технологий, molchanova_da@ipae.uran.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4141-9903>

Веселкин Денис Васильевич, доктор биологических наук, заведующий лабораторией биоразнообразия растительного мира и микобиоты, veselkin_dv@ipae.uran.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2902-2903>



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ



Аннотация. Оценили особенности естественного возобновления сосны в лесах с разной давностью низовых пожаров на Южном Урале в зависимости от уровня загрязнения тяжелыми металлами. На материалах, полученных на 81 пробной площади, заложенных в припевающих, спелых и перестойных сосновых лесах естественного происхождения в трех типах лесорастительных условий (ТЛУ 1 – ТЛУ 3), анализировали связь плотности всходов сосны с состоянием древостоев (сомкнутость крон, возраст древостоя, индекс жизненного состояния древостоя), с характеристиками состояния растительности (общее число видов, общее проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса, проективное покрытие мохового яруса), с внешними воздействиями (уровень загрязнения, расстояние от источника эмиссии, давность пожарного нарушения), с методическими особенностями исследования (год учетов). Высокая изменчивость оценок плотности всходов сосны не позволила выявить сопряженность плотности всходов с уровнем загрязнения и/или пожарными нарушениями. Плотность всходов нелинейно связана с проективным покрытием травяно-кустарничкового яруса. С увеличением покрытия травяно-кустарничкового яруса плотность всходов увеличивалась на участках с высокими уровнями загрязнения и снижалась на участках с фоновым загрязнением.

Ключевые слова: тяжелые металлы, низовые лесные пожары, сосновые леса, всходы, семена, естественное возобновление



Благодарности. Исследование выполнено в рамках темы госзадания ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН № 122040800079-3 и темы госзадания ИЭРиЖ УрО РАН № 122021000092-9.

Для цитирования: Куянцева Н. Б., Мумбер А. Г., Молчанова Д. А., Веселкин Д. В. Плотность всходов сосны обыкновенной в сосновых лесах под влиянием выбросов Карабашского медеплавильного комбината и лесных пожаров // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2024. Т. 24, вып. 3. С. 292–301. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2024-24-3-292-301>, EDN: SPSUSY

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Density of scots pine seedlings in pine forests under the influence of emissions from the Karabash copper smelter and forest fires

N. B. Kuyantseva¹✉, A. G. Mumber¹, D. A. Molchanova², D. V. Veselkin²

¹Ilmen State Reserve, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology of the Urals Branch of the Russian Academy of Sciences, Miass 456317, Russia

²Institute of Plant and Animal Ecology UB RAS, 202 March 8 St., 620144 Yekaterinburg, Russia

Nadezhda B. Kuyantseva, borisovna_k@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8746-2341>

Alexander G. Mumber, silver@mineralogy.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2345-5468>

Darya A. Molchanova, molchanova_da@ipae.uran.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4141-9903>

Denis V. Veselkin, veselkin_dv@ipae.uran.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2902-2903>

Abstract. We assessed the features of natural pine regeneration in forests with different ages of ground fires in the Southern Urals depending on the level of heavy metal pollution. Using the materials obtained from 81 sample plots laid in maturing, mature and over-mature pine forests of natural origin in three types of forest growth conditions (TFGC 1 – TFGC 3), the relationship between the density of pine seedlings and the state of forest stands (crown density, stand age, vital status index), with the characteristics of vegetation condition (total number of species, total projective cover of herb-shrub layer, projective cover of bryophytes layer), with external influences (pollution level, distance from emission source, duration of fire disturbance), and with the methodological features of the study (accounting year) was analyzed. The high variability of estimates of the density of pine seedlings did not allow us to identify the relationship between the density of seedlings and the level of pollution and/or fire disturbances. The density of seedlings is nonlinearly related to the protective cover of the herb-shrub layer. With increasing coverage of the herb-shrub layer, the density of seedlings increased in areas with high levels of pollution and decreased in areas with background pollution.

Keywords: heavy metals, ground forest fires, pine forests, shoots, seedlings, natural regeneration

Acknowledgments. This work was supported by the state assignment of the South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology of the Urals Branch of the Russian Academy of Sciences No. 122040800079-3 and the state task of the Institute of Plant and Animal Ecology UB RAS No. 122021000092-9.

For citation: Kuyantseva N. B., Mumber A. G., Molchanova D. A., Veselkin D. V. Density of scots pine seedlings in pine forests under the influence of emissions from the Karabash copper smelter and forest fires. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2024, vol. 24, iss. 3, pp. 292–301 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2024-24-3-292-301>, EDN: SPSUSY

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Изучение закономерностей лесообразовательного процесса лежит в основе рационального использования, сохранения и восстановления лесных ресурсов. Успешность естественного возобновления хвойных деревьев определяется их биоэкологическими свойствами и условиями среды [1–6]. В промышленных регионах все компоненты экосистем и экосистемные процессы, в том числе послепожарное восстановление сообществ, могут зависеть от уровней техногенного загрязнения [7–10]. В Челябинской области в настоящее время площади сосновых

лесов сокращаются, что связывают с недостаточной обеспеченностью приспевающих и спелых сосняков подростом сосны [11, 12]. Слабо изучены особенности естественного возобновления сосны в ходе послепожарного восстановления экосистем при разных уровнях техногенного загрязнения. Мы предположили, что плотность всходов сосны зависит как от техногенной нарушенности экосистем, так и от давности пожарных нарушений. Целью работы была проверка этого предположения на основе регистраций плотности всходов в условиях техногенного загрязнения и разной пожарной нарушенности лесов.



Материалы и методы

Работы провели в 2018–2023 гг. на Южном Урале в градиенте между лесами Ильменского государственного заповедника (ИГЗ) и импактной зоной Карабашского медеплавильного комбината (КМК). Территория исследования относится к восточному макросклону Уральской горной страны и прилегающей зоне Зауральяского пепелена. Климат континентальный, умеренно холодный. Преобладающие типы растительности – сосняки зеленомошные, зеленомошно-разнотравные, разнотравные и производные березняки злаково-разнотравные. Ильменский государственный заповедник – один из старейших в РФ (учрежден в 1920 г.). Леса занимают 85% площади ИГЗ, на долю сосновых древостоев приходится 55%, березовых – 45%. Пожары – закономерный и перманентный фактор существования сосновых лесов. В среднем на территории заповедника ежегодно возникает 14–16 лесных пожаров. Полный оборот огня в расчете на всю территорию заповедника составляет 360 лет [13, 14]. При этом за период 1948–2014 гг. число пожаров не только увеличилось [15], но и наблюдалось перераспределение локализации очагов возгораний в периферийные, пограничные кварталы заповедника [16].

КМК (г. Карабаш) – крупный источник атмосферных выбросов SO_2 и пыли тяжелых металлов. Зона нарушенных экосистем простирается до 15–25 км от КМК [17–19]. Химическое загрязнение экосистем имеет следствием изменение условий минерального питания растений [20–22].

Общее число пробных площадей (ПП) – 81. Они расположены в приспевающих, спелых и перестойных сосновых лесах естественного происхождения в трех типах лесорастительных условий (ТЛУ); ТЛУ 1 – вершины, ТЛУ 2 – склоны, ТЛУ 3 – подошвы склонов) на горных фрагментарных и горно-лесных бурых почвах (рис. 1). ПП по отношению к давности пожара были отнесены к двум группам: «недавно горелые» (от 1–14 лет) и «давно горелые» (15–60 лет). Горелыми считали ПП, пройденные низовыми устойчивыми средними пожарами. Годы пожаров устанавливали по Книгам учета пожаров Ильменского заповедника и Карабашского лесничества.

Уровень техногенного загрязнения определен на основании концентраций кислото-растворимых форм четырех приоритетных поллютантов (Cu, Zn, Pb, Cd), измеренных в смешанной пробе гумусово-аккумулятивного горизонта почвы. Индекс загрязнения (ИТН) рассчитан как среднее превышение (количество раз) концентраций металлов на каждой площади по сравнению с наименее загрязненной фоновой площадью [23].

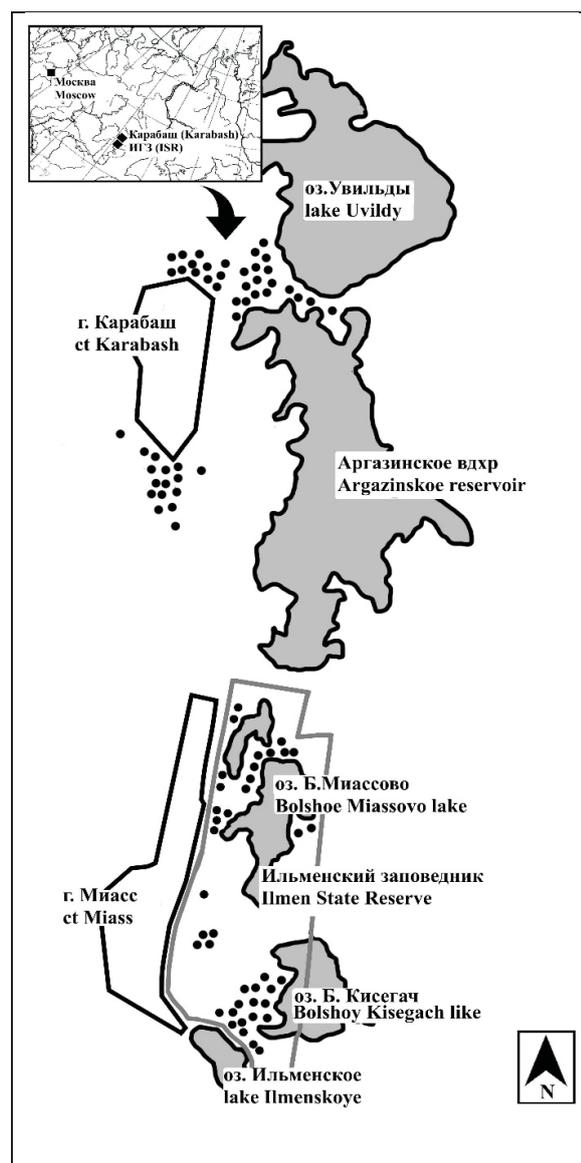


Рис. 1. Карта-схема расположения пробных площадей (черные круги) в сосновых лесах Ильменского заповедника и в окрестностях г. Карабаш

Fig. 1. Schematic map of the location of sample plots (black circles) in the pine forests of the Ilmen Reserve and in the vicinity of the city of Karabash



На каждой ПП (таблица) оценивали сомкнутость крон деревьев, индекс жизненного состояния древостоя (ИЖС) [24], общее проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса (ОПП ТКЯ), проективное покрытие мохового яруса. Плотность однолетних всходов сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) определяли на 15 учетных площадках 2×2 м [25]. Расчеты проводили с логарифмированными величинами плотности всходов. При анализе данных использовали разные варианты GLM, включая дисперсионный анализ (ANOVA), корреляцию (коэффициент корреляции Пирсона, r) и регрессию, линейную и нелинейную.

Результаты и их обсуждение

В зеленомошных типах леса, в сравнении с разнотравно-вейниковыми и широколиственными, под пологом приспевающих, спелых и перестойных древостоев в ИГЗ формируются более благоприятные условия для естественного возобновления сосны. При сравнении территорий ИГЗ и КМК выявлено (см. таблицу), что на недавно горелых ПП в среднем в 1,1–1,3 раза

число всходов выше, чем на давно горелых при достаточно большом размахе варьирования данных. В результате разрушения живого почвенного покрова после пожара на начальных этапах лесовосстановления в экосистемах формируются субстраты с открытыми минеральными почвенными горизонтами, которые способствуют успешному возобновлению сосны.

Качественное состояние взрослых особей сосны, участвующих в репродукции, отражает комплексный показатель ИЖС. ИЖС сосновых древостоев уменьшается при увеличении ИТН ($r = -0,4530$; $P < 0,0001$) и увеличивается при увеличении возраста древостоя ($r = 0,3105$; $P = 0,0045$). ИЖС положительно связан с ОПП ТКЯ ($r = 0,4587$; $P < 0,0001$) и покрытием мхов ($r = 0,4053$; $P = 0,0002$), что характеризует полночленность нижних ярусов лесных сообществ. ИЖС выше в давно горевших сосняках ($F_{(1;80)} = 6,64$; $P = 0,0118$); зависит от района: больше в ИГЗ по сравнению с КМК ($F_{(1;80)} = 22,03$; $P < 0,0001$). С уменьшением степени загрязнения территории (в градиенте сосновых лесов от КМК до ИГЗ) достоверно увеличивается число видов ТКЯ ($F_{(1;80)} = 104,86$; $P < 0,0001$).

Характеристика пробных площадей района исследований

Table. Characteristics on the sample plots of the research area

Район / Areas	N	ИТН / TLI	Давность пожара / Period of fire	ИЖС / VSI	Численность всходов, экз./га / Number of seedlings, individual/ha	Сомкнутость крон, % / Crown density, %	Число видов ТКЯ / ОПП, % / Number of species HSL / PC, %	Проективное покрытие мхов, % / Projective cover of bryophytes, %
ИГЗ / ISR	12	2,0	Ндгор / RB	$\frac{0,6}{0,58-0,81}$	$\frac{12800}{0-62000}$	50–60	$\frac{37}{40-50}$	30–40
	28	5,7	Дгор / LB	$\frac{0,7}{0,44-0,82}$	$\frac{9500}{0-41500}$			
КМК / KCS	16	83,1	Ндгор / RB	$\frac{0,6}{0,37-0,73}$	$\frac{16600}{0-80000}$	30–40	$\frac{16}{5-10}$	<1
	25	67,4	Дгор / LB	$\frac{0,6}{0,35-0,74}$	$\frac{14400}{0-60000}$			

Примечание. ИГЗ – Ильменский государственный заповедник, КМК – Карабашский медеплавильный комбинат; N – число пробных площадей; ИТН – индекс техногенной нагрузки; Ндгор – «недавно горелые», Дгор – «давно горелые» пробные площади; ИЖС – индекс жизненного состояния древостоя; ТКЯ – травяно-кустарничковый ярус; ОПП – общее проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса; над чертой – средний показатель, под чертой – размах варьирования данных.

Note. ISR – Ilmen State Reserve, KCS – Karabash copper smelter; N – number of sample plots; TLI – technogenic load index; RB – “recently burned” on the sample plots, LB – “long burned” on the sample plots; VSI – vital status index; HSL – number of species of herb-shrub layer on the sample plots; PC – projective cover of the herb-shrub layer; above the line is the average, below the line is the range of data variation.



Сильных или однозначных детерминантов плотности всходов сосны в изученных древостоях не было установлено. В нашем массиве данных плотность всходов сосны оказалась не связанной ни с состоянием древостоев (сомкнутость крон, возраст древостоя, ИЖС; рис. 2), ни с характеристиками состояния растительности на пробных площадях (общее число видов на ПП, ОПП ТКЯ, проективное покрытие мохового яруса; рис. 3), ни с внешними воздействиями (уровень загрязнения, расстояние от источника эмиссии, давность пожарного нарушения; рис. 4), ни с погодными особенностями лет проведения исследований. Не удалось установить значимого влияния этих факторов на успешность естественного возобновления ни по отдельности, ни при учете их совместного влияния. Одно из объяснений этого – высокая изменчивость оценок плотности всходов, которая в зависимости от района исследования составляла 3–5 порядков (см. таблицу).

Установлена зависимость плотности всходов сосны только от проективного покрытия травяно-кустарничкового яруса. Эта связь по-разному проявлялась в разных частях изучаемого градиента. На ПП вблизи КМК плотность всходов с ростом ОПП ТКЯ увеличивалась (рис. 5, а; $r = 0,32$; $P = 0,0409$; $n = 41$). На ПП в ИГЗ плотность всходов с ростом ОПП ТКЯ уменьшалась ($r = -0,22$; $P = 0,1644$; $n = 40$). Несмотря на то что в районе ИГЗ обсуждаемая корреляционная связь статистически незначима, можно доказать, что зависимости между ОПП ТКЯ и плотностью всходов в разных частях изучаемого градиента различны. Для этого использовали общие линейные модели (GLM) с непрерывным предиктором «ОПП ТКЯ» ($dF = 1$), дискретным предиктором «часть градиента» (ИГЗ или КМК, $dF = 1$) и оценкой взаимодействия между ними. Установлены следующие эффекты: для фактора «ОПП ТКЯ»: $F = 0,02$; $P = 0,8844$; для фактора «часть

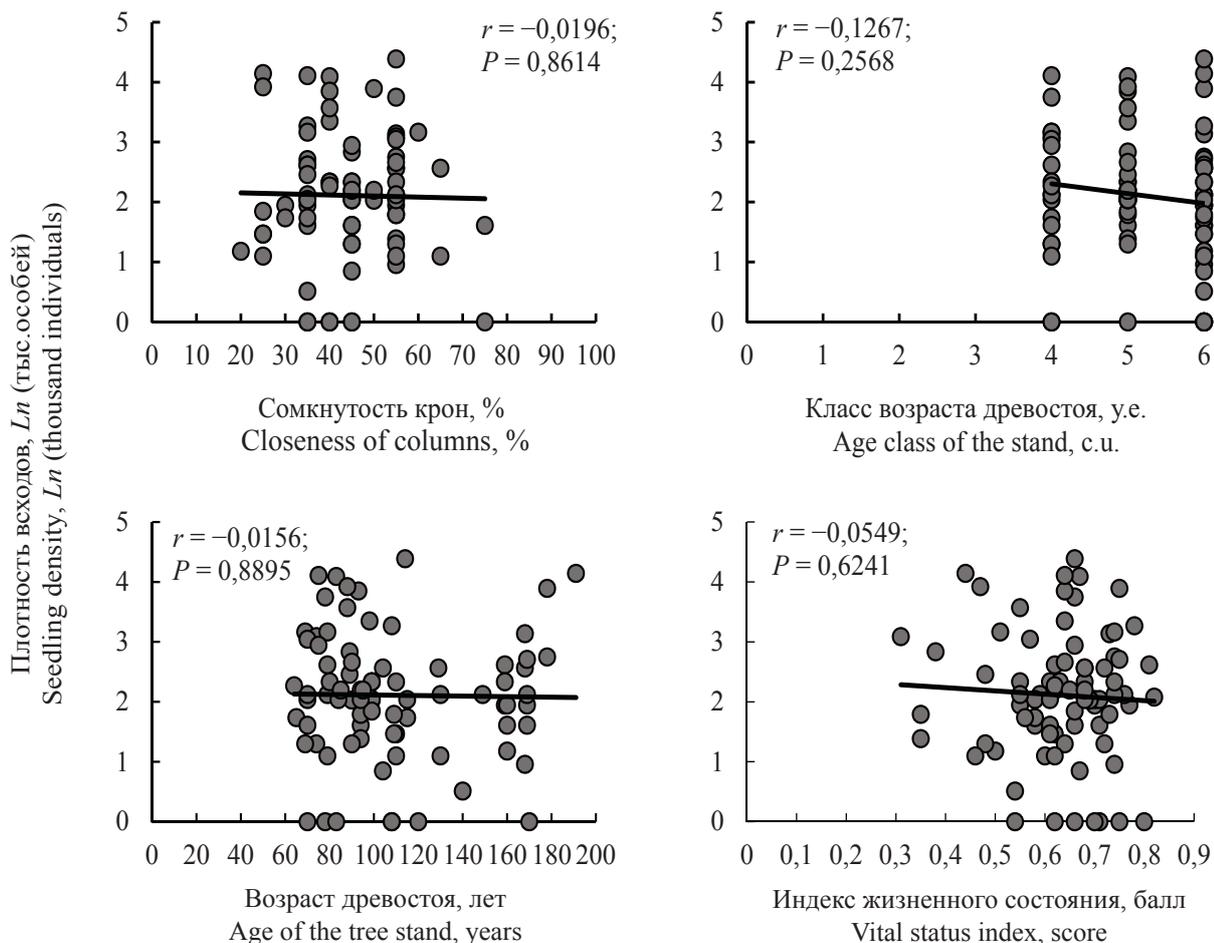


Рис. 2. Зависимость плотности всходов сосны от характеристик состояния древостоев на пробных площадях
Fig. 2. Dependence of the density of pine seedlings on the characteristics of the state of forest stands on the sample plots

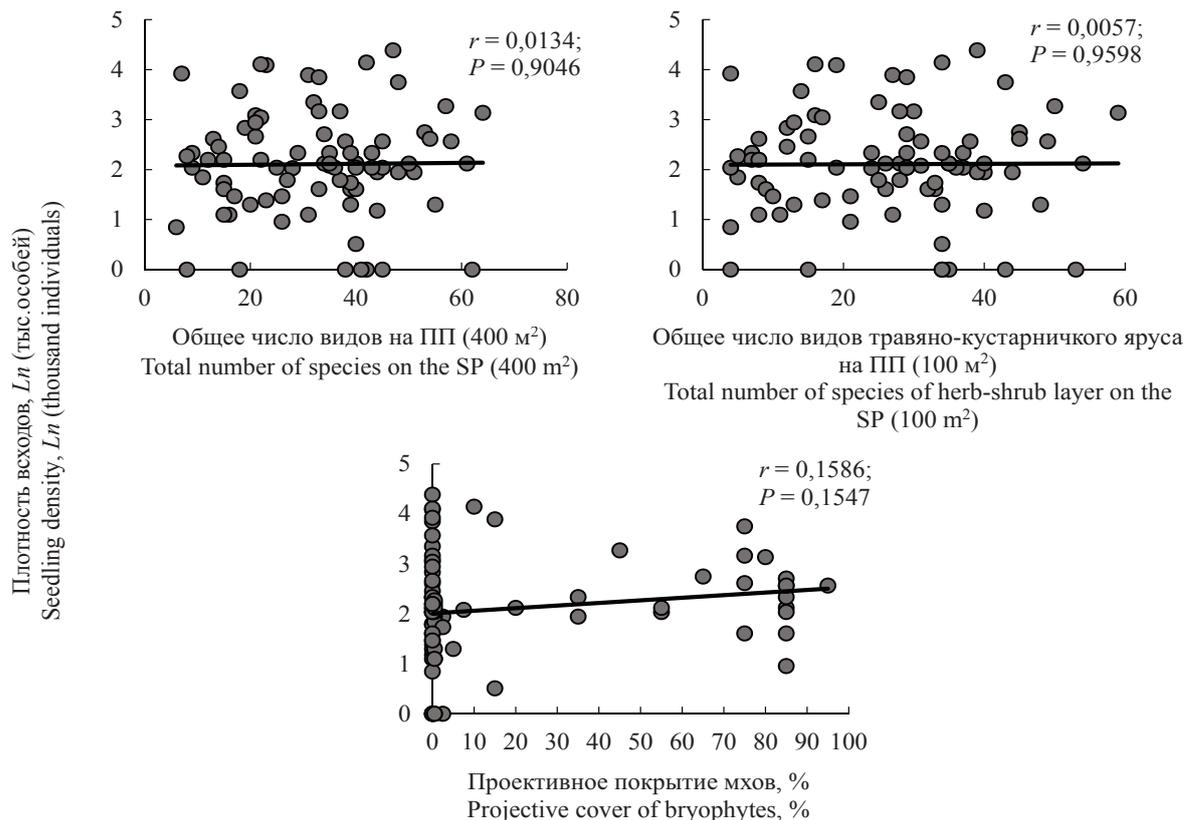


Рис. 3. Зависимость плотности всходов сосны от характеристик состояния растительности на пробных площадях
 Fig. 3. Dependence of the density of pine seedlings on the characteristics of the state of vegetation in the sample plots

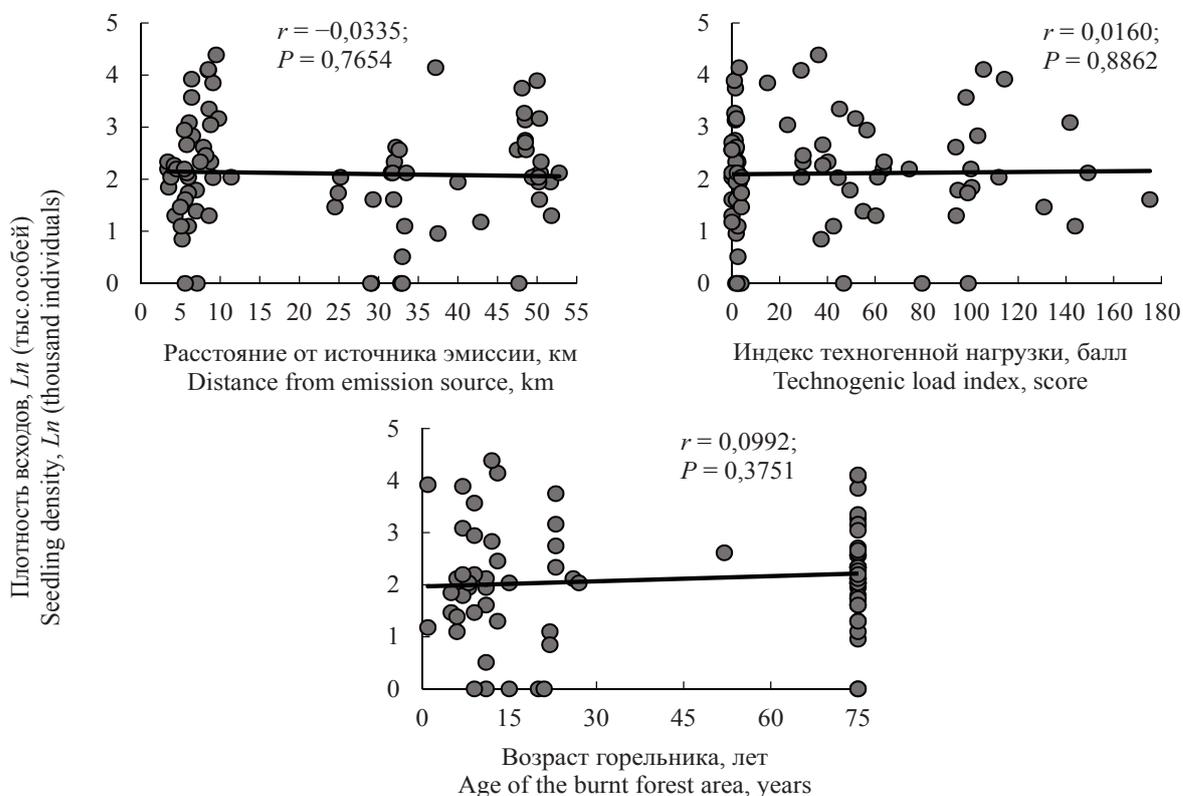


Рис. 4. Зависимость плотности всходов сосны от характеристик внешнего воздействия на пробных площадях
 Fig. 4. Dependence of the density of pine seedlings on the characteristics of external influence on the sample plots



Рис. 5. Зависимость плотности всходов сосны в районе КМК (серые круги; одиночная черная линия) и ИГЗ (белые круги; сдвоенная линия) от проективного покрытия травяно-кустарничкового яруса с отдельной аппроксимацией зависимостей в районах КМК и ИГЗ (а) и с общей параболической аппроксимацией (б)

Fig. 5. Dependence of the density of pine seedlings in the KCS area (gray circles; single black line) and ISR (white circles; double line) on the projective cover of the herb-shrub layer with separate approximation of the dependencies in the KCS and ISR areas (a) and with a general parabolic approximation (b)

градиента»: $F = 0,45$; $P = 0,5066$; для взаимодействия «ОПП ТКЯ» × «часть градиента»: $F = 5,58$; $P = 0,0207$. Значимое взаимодействие указывает, что направления связей между проективным покрытием ТКЯ и плотностью всходов разные в двух частях изучаемого градиента. Другим образом иллюстрируется нелинейность связи между проективным покрытием ТКЯ (x) и логарифмированной плотностью всходов (y) с использованием параболической аппроксимации (рис. 5, б):

$$y = 1,8176 + 0,0422 \times x - 0,0006 \times x^2$$

(коэффициенты при x и x^2 статистически значимы: $P = 0,0082$ и $P = 0,0054$ соответственно). Следовательно, в полном массиве наших оценок связь между проективным покрытием ТКЯ и плотностью всходов сосны действительно нелинейна. Близкие закономерности для возобновления хвойных показаны в техногенном градиенте возле Среднеуральского медеплавильного завода [26].

Заключение

Оценивали особенности естественного возобновления сосны в разновозрастных горельниках на Южном Урале в зависимости

от уровня загрязнения тяжелыми металлами. Низкая плотность всходов сосны при низком покрытии травяно-кустарничкового яруса в градиенте техногенного воздействия между Карабашским медеплавильным комбинатом и Ильменским заповедником обусловлена, вероятно, последствиями техногенного загрязнения. Низкая плотность всходов сосны при высоком покрытии травяно-кустарничкового яруса может быть объяснена его прямым конкурентным воздействием на всходы. Мы полагаем, что для начальных этапов восстановления сосны в изученном градиенте условий в основном критичны косвенные эффекты, связанные с ценотическими перестройками, обусловленными техногенным воздействием. Таким образом, наше рабочее предположение не подтвердилось: прямые токсические эффекты для плотности всходов сосны не подтверждены, как и какие-либо эффекты, связанные с периодическими пожарными нарушениями сосновых лесов.

Список литературы

1. Санников С. Н. Экология и география естественного возобновления сосны обыкновенной. М. : Наука, 1992. 264 с.



2. Dawe D. A., Peters V. S., Flannigan M. D. Post-fire regeneration of endangered limber pine (*Pinus flexilis*) at the northern extent of its range // *Forest Ecol. Manag.* 2020. Vol. 457. P. 117725. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117725>
3. Cater T. C., Chapin III F. S. Differential effects of competition or microenvironment on boreal tree seedling establishment after fire // *Ecology*. 2000. Vol. 81, № 4. P. 1086–1099. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2000\)081\[1086:DEOCOM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2000)081[1086:DEOCOM]2.0.CO;2)
4. Wang B., Gu Z., Shu L., Shi C., Chen F., Bai Y., Liu X. The characteristics of seedling regeneration and its influencing factors of *Pinus tabulaeformis* under different wildfire severity of Liaohuyuan Nature Reserve // *Nat. Hazards Res.* 2021. Vol. 1, № 3. P. 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2021.06.002>
5. Korb J. E., Fornwalt P. J., Stevens-Rumann C. S. What drives ponderosa pine regeneration following wildfire in the western United States? // *Forest Ecology and Management*. 2019. Vol. 454, № 15. P. 117663. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117663>
6. Черненкова Т. В. Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение. М. : Наука, 2002. 191 с.
7. Горшков В. В., Ставрова Н. И. Возрастная структура популяций *Pinus sylvestris* L. в северотаежных сосновых лесах с различной давностью пожара // *Растительные ресурсы*. 2002. Т. 38, № 1. С. 3–24.
8. Менщиков С. Л., Барановский В. В., Кузьмина Н. А. Плотность подроста сосны обыкновенной после низовых пожаров в зоне аэротехногенного загрязнения // *Экология*. 2013. № 5. С. 330–333. <https://doi.org/10.7868/s0367059713050107>
9. Ярмишко В. Т., Игнатьева О. В. Сообщества *Pinus sylvestris* L. в техногенной среде на Европейском Севере России: структура, особенности роста, состояние // *Сибирский лесной журнал*. 2021. № 3. С. 44–55. <https://doi.org/10.15372/SJFS20210305>
10. Гаврилова О. И., Грязькин А. В. Особенности самовозобновления сосны на гари // *Лесной вестник*. 2022. Т. 26, № 3. С. 69–74. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-3-69-74>
11. Жучков Е. Л., Степанов А. С., Стародубцева Н. И., Павловский С. А. Приживаемость лесных культур сосны в условиях Джабык-Карагайского бора // *Лесной комплекс: состояние и перспективы развития* : сб. науч. тр. Брянск, 2002. Вып. 3. С. 27–28.
12. Хатмуллин Р. З., Кулагин А. Ю., Уразгильдин Р. В. Оценка естественного возобновления сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в естественных и антропогенно-нарушенных ландшафтах Южного Урала // *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2009. № 6. С. 412–414.
13. Дубинин А. Е., Залесов С. В. Горимость сосновых лесов Ильменского заповедника и послепожарные последствия в них // *Вестник БГАУ*. 2016. № 3 (39). С. 101–107.
14. Дубинин А. Е., Мумбер А. Г., Григорьев В. В., Платонов Е. Ю., Ольховка И. Э. Хронология лесных пожаров в Ильменском заповеднике // *Лесной вестник*. 2007. № 8. С. 7–11.
15. Чибилев А. А., Веселкин Д. В., Куянцева Н. Б., Чащина О. Е., Дубинин А. Е. Динамика лесных пожаров и климата Ильменского заповедника в 1948–2013 гг. // *Доклады Академии наук*. 2016. Т. 468, № 5. С. 575–578. <https://doi.org/10.7868/S0869565216170187>
16. Veselkin D., Pustovalova L., Kuyantseva N., Mumber A. Trends in forest fire occurrence in the Ilmensky nature reserve, Southern Urals, Russia, between 1948 and 2014 // *Forests*. 2022. Vol. 13, № 4. P. 528. <https://doi.org/10.3390/f13040528>.
17. Коротева Е. В., Веселкин Д. В., Куянцева Н. Б., Мумбер А. Г., Чащина О. Е. Накопление тяжелых металлов в разных органах березы повислой возле Карабашского медеплавильного комбината // *Агрохимия*. 2015. № 3. С. 88–96.
18. Коротева Е. В., Веселкин Д. В., Куянцева Н. Б., Чащина О. Е. Подход к зонированию нарушенных территорий на основе содержания тяжелых металлов в органах сосны обыкновенной (на примере региона Карабашского медеплавильного комбината) // *Вестник СВНЦ ДВО РАН*. 2015. № 3. С. 86–93.
19. Чащина О. Е., Куянцева Н. Б., Мумбер А. Г., Потапкин А. Б., Веселкин Д. В. Живой напочвенный покров сосновых лесов под влиянием лесных пожаров в районе выбросов Карабашского медеплавильного комбината // *Вестник ОГПУ. Электронный научный журнал [Электронный ресурс]*. 2017. № 4 (24). С. 44–53.
20. Чащина О. Е., Чибилев А. А., Веселкин Д. В., Куянцева Н. Б., Мумбер А. Г. Содержание тяжелого изотопа азота ¹⁵N в растениях увеличивается возле крупного медеплавильного комбината // *Доклады Академии наук*. 2018. Т. 482, № 3. С. 355–358 <https://doi.org/10.31857/S086956520003147-4>
21. Веселкин Д. В., Чащина О. Е., Куянцева Н. Б., Мумбер А. Г. Стабильные изотопы углерода и азота в древесных и травянистых растениях возле крупного медеплавильного комбината // *Геохимия*. 2019. Т. 64, № 5. С. 529–537. <https://doi.org/10.31857/S0016-7525645529-537>
22. Veselkin D., Kuyantseva N., Mumber A., Molchanova D., Kiseleva D. $\delta^{15}\text{N}$ in birch and pine leaves in the vicinity of a large copper smelter indicating a change in the conditions of their soil nutrition // *Forests*. 2022. Vol. 13, № 8. P. 1299. <https://doi.org/10.3390/f13081299>
23. Воробейчик Е. Л., Садыков О. Ф., Фарафонов М. Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем (локальный уровень). Екатеринбург : УИФ «Наука», 1994. 280 с.
24. Алексеев В. А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев // *Лесоведение*. 1989. № 4. С. 51–57.



25. Побединский А. В. Изучение лесовосстановительных процессов. М.: Наука, 1966. 64 с.
26. Веселкин Д. В. Изменение численности всходов и подроста *Picea obovata* Ledeb. и *Abies sibirica* Ledeb. в темнохвойных южно-таежных лесах в условиях загрязнения выбросами Среднеуральского медеплавильного завода (Свердловская область) // Растительные ресурсы. 2004. Т. 40, № 1. С. 28–38.

References

1. Sannikov S. N. *Ekologiya i geografiya estestvennogo vozobnovleniya sosny obyknovennoy* [Ecology and geography of natural regeneration of Scots pine]. Moscow, Nauka, 1992. 264 p. (in Russian).
2. Dawe D. A., Peters V. S., Flannigan M. D. Post-fire regeneration of endangered limber pine (*Pinus flexilis*) at the northern extent of its range. *Forest Ecol. Manag.*, 2020, vol. 457, pp. 117725. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117725>
3. Cater T. C., Chapin III F.S. Differential effects of competition or microenvironment on boreal tree seedling establishment after fire. *Ecology*, 2000, vol. 81, no. 4, pp. 1086–1099. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2000\)081\[1086:DEOCOM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2000)081[1086:DEOCOM]2.0.CO;2)
4. Wang B., Gu Z., Shu L., Shi C., Chen F., Bai Y., Liu X. The characteristics of seedling regeneration and its influencing factors of *Pinus tabulaeformis* under different wildfire severity of Liaoheyuan Nature Reserve. *Nat. Hazards Res.*, 2021, vol. 1, no. 3, pp. 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2021.06.002>
5. Korb J. E., Fornwalt P. J., Stevens-Rumann C. S. What drives ponderosa pine regeneration following wildfire in the western United States? *Forest Ecol. Manag.*, 2019, vol. 454, no. 15, pp. 117663. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117663>
6. Chernenkova T. V. *Reaktsiya lesnoy rastitel'nosti na promyshlennoye zagryazneniye* [Response of forest vegetation to industrial pollution]. Moscow, Nauka, 2002. 191 p. (in Russian).
7. Gorshkov V. V., Stavrova N. I. Age structure of *Pinus sylvestris* L. populations in north taiga pine woods which were exposed to forest fires at various periods. *Plant Resources*, 2002, vol. 38, no. 1, pp. 3–24 (in Russian).
8. Menshchikov S. L., Baranovskii V. V., Kuzmina N. A. Density of scots pine undergrowth after ground fires in a zone of industrial air pollution. *Russ. J. Ecol.*, 2013, vol. 44, no. 5, pp. 367–370. <https://doi.org/10.1134/S106741361305010X>
9. Yarmishko V. T., Ignatieva O. V. Communities of *Pinus sylvestris* L. in the technogenic environment in the European north of Russia: Structure, features of growth, condition. *Siberian Journal of Forest Science*, 2021, no. 3, pp. 44–55 (in Russian). <https://doi.org/10.15372/SJFS20210305>
10. Gavrilova O. I., Gryazkin A. V. Pine self-regeneration in burnt forest area. *Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 3, pp. 69–74 (in Russian). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-3-69-74>
11. Zhuchkov E. L., Stepanov A. S., Starodubtseva N. I., Pavlovsky S. A. Survival of pine forest crops in the conditions of Jabyk-Karagai forest. *Lesnoy kompleks: sostoyaniye i perspektivy razvitiya: sbornik nauchnykh trudov* [Forest complex: State development prospects: Coll. of sci. arts]. Bryansk, 2002, no. 3, pp. 27–28 (in Russian).
12. Khatmullin R. Z., Kulagin A. Yu., Urazgildin R. V. Assessment of the natural renewal of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in natural and anthropogenically disturbed landscapes of the Southern Urals. *Bulletin of Orenburg State University*, 2009, no. 6, pp. 412–414 (in Russian).
13. Dubinin A. E., Zalesov S. V. Fire occurrence in Ilmen Reserve pine forest and after-fire effects in them. *Bulletin of the Bashkir State Agrarian University*, 2016, no. 3 (39), pp. 101–107 (in Russian).
14. Dubinin A. E., Mumber A. G., Grigoriev V. V., Platonov E. Yu., Olkhovka I. E. Chronology of forest fires in the Ilmen Reserve. *Forestry Bulletin*, 2007, no. 8, pp. 7–11 (in Russian).
15. Chibilev A. A., Veselkin D. V., Kuyantseva N. B., Chashchina O. E., Dubinin A. E. Dynamics of forest fires and climate in Ilmen nature reserve, 1948–2013. *Dokl. Earth Sci.*, 2016, vol. 468, no. 2, pp. 619–622. <https://doi.org/10.1134/S1028334X16060106>
16. Veselkin D., Pustovalova L., Kuyantseva N., Mumber A. Trends in forest fire occurrence in the Ilmensky nature reserve, Southern Urals, Russia, between 1948 and 2014. *Forests*, 2022, vol. 13, no. 4, pp. 528. <https://doi.org/10.3390/f13040528>.
17. Koroteeva E. V., Veselkin D. V., Kuyantseva N. B., Mumber A. G., Chashchina O. E. Accumulation of heavy metals in the different *Betula pendula* Roth organs near the Karabash copper smelter. *Agrohimia*, 2015, no. 3, pp. 88–96 (in Russian).
18. Koroteeva E. V., Veselkin D. V., Kuyantseva N. B., Chashchina O. E. Approach to the industrially polluted area zoning based on heavy metals concentrations in the common pine organs (example of the Karabash copper smelter area). *Bull. North-East Sci. Cent. FEB RAS*, no. 3, pp. 86–93 (in Russian).
19. Chashchina O. E., Kuyantseva N. B., Mumber A. G., Potapkin A. B., Veselkin D. V. Ground vegetation of the pine forest affected by forest fires in the gradient of emissions of the Karabash Copper Smelter. *Bull. Orenbg. State Pedagog. Univ. Electron. Sci. J.*, 2017, no. 4 (24), pp. 44–53 (in Russian).
20. Chashchina O. E., Chibilev A. A., Veselkin D. V., Kuyantseva N. B., Mumber A. G. The natural abundance of heavy nitrogen isotope (^{15}N) in plants increases near a large copper smelter. *Doklady Biological Sciences*, 2018, vol. 482, no. 1, pp. 198–201. <https://doi.org/10.1134/S0012496618050083>



21. Veselkin D. V., Chashchina O. E., Kuyantseva N. B., Mumber A. G. Stable carbon and isotopes in woody plants and herbs the large copper smelting plant. *Geochem. Int.*, 2019, vol. 57, no. 5, pp. 575–582. <https://doi.org/10.1134/S0016702919050124>
22. Veselkin D., Kuyantseva N., Mumber A., Molchanova D., Kiseleva D. $\delta^{15}\text{N}$ in birch and pine leaves in the vicinity of a large copper smelter indicating a change in the conditions of their soil nutrition. *Forests*, 2022, vol. 13, no. 8, pp. 1299. <https://doi.org/10.3390/f13081299>
23. Vorobeychik E. L., Sadykov O. F., Farafontov M. G. *Ekologicheskoe normirovanie tekhnogennykh zagryazneniy nazemnykh ekosistem (lokal'nyy uroven')* [Ecological standardization of terrestrial ecosystems technogenic pollution (local scale)]. Yekaterinburg, UIF "Nauka", 1994. 280 p. (in Russian).
24. Alekseev V. A. Diagnostics of the vital state of trees and forest stands. *Lesovedenie*, 1989, no. 4, pp. 51–57 (in Russian).
25. Pobedinsky A. V. *Izucheniye lesovosstanovitelnykh protsessov* [Study of forest restoration processes]. Moscow, Nauka, 1966. 64 p. (in Russian).
26. Veselkin D. V. Change in the number of seedlings and undergrowth of *Picea obovata* Ledeb. and *Abies sibirica* Ledeb. in dark coniferous southern taiga forests under conditions of pollution from emissions from the Sredneuralsk copper smelter (Sverdlovsk region). *Plant Resources*, 2004, vol. 40, no. 1, pp. 28–38 (in Russian).

Поступила в редакцию: 24.12.2023; одобрена после рецензирования 21.02.2024; принята к публикации 22.02.2024; опубликована 30.09.2024

The article was submitted 24.12.2023; approved after reviewing 21.02.2024; accepted for publication 22.02.2024; published 30.09.2024