

5. Hilton M., Konlechner T., McLachlan K. et al. Long-lived seed banks of *Ammophila arenaria* prolong dune restoration programs // *Journal of Coastal Conservation*. 2019. V. 23. P. 461–471.
6. Grewell B.J., Gillard M.B., Futrell C. J. et al. Seedling Emergence from Seed Banks in *Ludwigia hexapetala* - Invaded Wetlands: Implications for Restoration // *Plants*. 2019. V. 8, № 11. P. 451.
7. Komulainen M., Vieno M., Yarmishko V.T. et al. Seedling establishment from seeds and seed banks in forests under long-term pollution stress: a potential for vegetation recovery // *Can. J. Bot.* 1994. V. 72. P. 143–149.
8. Huopalaainen M., Tuittila E.-S., Vanha-Majamaa I. et al. The potential of soil seed banks for revegetation of bogs in SW Finland after long-term aerial pollution // *Annales Botanici Fennici*. 2000. V. 37. P. 1–9.
9. Huopalaainen M., Tuittila E.-S., Vanha-Majamaa I. et al. Effects of Long-Term Aerial Pollution on Soil Seed Banks in Drained Pine Mires in Southern Finland // *Water, Air, & Soil Pollution*. 2001. V. 125. P. 69–79.
10. Salemaa M., Uotila T. Seed bank composition and seedling survival in forest soil polluted with heavy metals // *Basic and Applied Ecology*. 2001. V. 2, № 3. P. 251–263.
11. Wagner M., Heinrich W., Jetschke G. Seed bank assembly in an unmanaged ruderal grassland recovering from long-term exposure to industrial emissions // *Acta Oecologica*. 2006. V. 30, № 3. P. 342–352.
12. Meerts P., Grommesch C. Soil seed banks in a heavy-metal polluted grassland at Prayon (Belgium) // *Plant Ecology*. 2001. V. 155. P. 35–45.

УДК 574.4:502.5

**ЕСТЕСТВЕННОЕ ВОЗОБНОВЛЕНИЕ СОСНЫ В СОСНОВЫХ ЛЕСАХ
ПОД ВЛИЯНИЕМ ВЫБРОСОВ КАРАБАШСКОГО МЕДЕПЛАВИЛЬНОГО КОМБИНАТА
И ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ**

Н.Б. Куянцева¹, А.Г. Мумбер¹, Д.А. Молчанова^{1,2}, Д.В. Веселкин²

¹Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии Уральского
отделения Российской академии наук, Миасс, Россия

²Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург, Россия

**NATURAL REGENERATION OF PINE IN PINE FORESTS UNDER THE INFLUENCE
OF EMISSIONS FROM THE KARABASH COPPER SMELTER AND FOREST FIRES**

N.B. Kuyantseva¹, A.G. Mumber¹, D.A. Molchanova^{1,2}, D.V. Veselkin²

¹South Ural Scientific Centre Mineralogy and Environmental Geology of the Ural branch Russian
Academy of Sciences, Miass, Russia

²Institute of Plant and Animal Ecology UB RAS, Ekaterinburg, Russia
borisovna_k@mail.ru

Аннотация. Оценили особенности естественного возобновления сосны в разновозрастных горельниках на Южном Урале в зависимости от уровня загрязнения тяжелыми металлами. 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.

Успешность естественного возобновления лесных деревьев определяется их биоэкологическими свойствами и условиями среды [1, 2]. В промышленных регионах все компоненты экосистем и экосистемные процессы, в том числе, послепожарное восстановление сообществ, могут зависеть от уровней техногенного загрязнения [3-5]. В Челябинской области в настоящее время площади сосновых лесов сокращаются, что связывают с недостаточной обеспеченностью преспевающих и спелых сосняков подростом сосны [6, 7]. Цель работы: изучение особенностей естественного возобновления сосны в ходе послепожарного восстановления экосистем при разных уровнях техногенного загрязнения. Предполагали, что плотность всходов сосны зависит как от техногенной нарушенности экосистем, так и от давности пожарных нарушений.

Работы провели в 2018–2023 гг. на Южном Урале в градиенте между лесами Ильменского государственного заповедника (ИГЗ, 85% площади которого занимают леса) и импактной зоной Карабашского медеплавильного комбината (КМК). Пожары – закономерный и перманентный фактор существования сосновых лесов; за 1948–2014 гг. число пожаров в ИГЗ увеличилось и наблюдалось перераспределение локализации очагов возгораний [8]. КМК (г. Карабаш) – крупный источник атмосферных выбросов SO_2 и пыли тяжелых металлов. Зона нарушенных экосистем простирается до 15–25 км от КМК [9]. 81 ПП расположена в приспевающих, спелых и перестойных сосновых лесах естественного происхождения в трех типах лесорастительных условий (ТЛУ). По давности пожарного воздействия ПП относили к одной из двух групп: «недавно горелые» (давность последнего пожара 1–14 лет) и «давно горелые» (давность пожара более 14 лет; сюда же отнесли ПП, на которых пожары не были задокументированы; для таких ПП давность пожара приняли за 55 лет). Горелыми считали ПП, пройденные низовыми устойчивыми средними пожарами. Годы пожаров устанавливали по Книгам учета пожаров Ильменского заповедника и Карабашского лесничества. Уровень техногенного загрязнения определяли на основании концентраций кислоторастворимых форм Cu, Zn, Pb и Cd, в гумусово-аккумулятивном горизонте почв [10]. На каждой ПП определяли сомкнутость крон деревьев, индекс жизненного состояния древостоя (ИЖС) [11], общее проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса (ОПП ТКЯ), плотность однолетних всходов сосны обыкновенной на 15 учетных площадках 2×2 м [12].

Сильных или однозначных детерминантов плотности всходов сосны не установлено. В нашем массиве данная плотность всходов сосны оказалась не связанной ни со свойствами местообитаний (ТЛУ), ни с состоянием древостоев (возраст древостоя, ИЖС, сомкнутость крон), ни с внешними воздействиями (уровень загрязнения, давность пожарного нарушения), ни с методическими особенностями исследования (год учетов). 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. Например, на ПП в ИГЗ плотность всходов варьировала в диапазоне 0–62 тыс. всходов / га, на ПП вблизи КМК – в диапазоне 0–79 тыс. всходов / га, т.е. изменчивость оценок плотности всходов составляла 3–5 порядков. Поэтому все расчеты проводили с логарифмированными величинами плотности всходов.

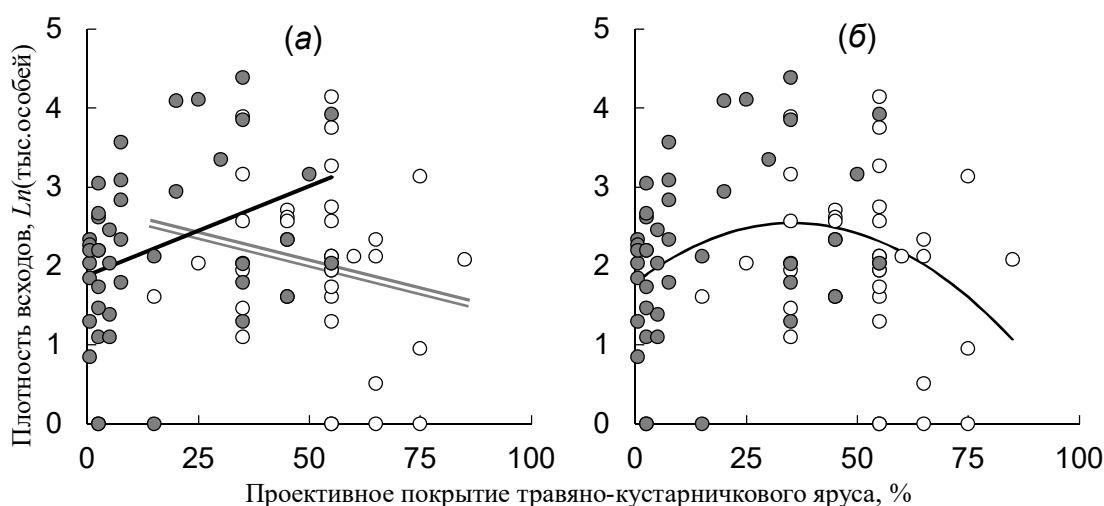


Рисунок. Зависимость плотности всходов сосны в районе КМК (серые круги; одиночная черная линия) и ИГЗ (белые круги; двойная линия) от проективного покрытия травяно-кустарничкового яруса с отдельной аппроксимацией зависимостей в районах КМК и ИГЗ (а) и с общей параболической аппроксимацией (б)

Установлена зависимость плотности всходов сосны 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. 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 континуальным 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 градиента": $F = 0.45$; $P = 0.5066$; для взаимодействия "ОПП ТКЯ" \times "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. 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 не линейна. Близкие закономерности для возобновления хвойных показаны в техногенном градиенте возле Среднеуральского медеплавильного завода [13].

Низкая плотность всходов сосны при низком покрытии травяно-кустарничкового яруса обусловлена, вероятно, последствиями техногенного загрязнения. Низкая плотность всходов сосны при высоком покрытии ТКЯ 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 ценогическими перестройками, обусловленными техногенным воздействием. Таким образом, прямые токсические эффекты для плотности всходов сосны не подтверждены, как и какие-либо эффекты, связанные с периодическими пожарными нарушениями сосновых лесов.

Источники финансирования работы:

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 23-24-10055).

Список литературы:

1. Санников С.Н. Экология и география естественного возобновления сосны обыкновенной. М.: Наука, 1992. 264 с.
2. Черненко Т.В. Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение. М.: Наука, 2002. 191 с.
3. 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.
4. 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.
5. Ярмишко В.Т., Игнатъева 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.
6. 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. вып. 3. Брянск, 2002. С. 27–28.
7. 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.
8. 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. V. 13, № 4. 528. DOI: 10.3390/f13040528.
9. Коротева Е.В., Веселкин Д.В., Куянцева Н.Б., Мумбер А.Г. Накопление тяжелых металлов в разных органах березы повислой возле Карабашского медеплавильного комбината // Агрохимия. 2015. № 3. С. 88–96.
10. Воробейчик Е.Л., Садыков О.Ф., Фарафонов М.Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем (локальный уровень). Екатеринбург: УИФ «Наука», 1994. 280 с.
11. Алексеев В.А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев // Лесоведение. 1989. № 4. С. 51–57.
12. Побединский А. В. Изучение лесовосстановительных процессов. М. : Наука, 1966. 64 с.
13. 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. 28–39.