

СЕЛЬСКОЕ И ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

УДК 630*232:622.882

doi: 10.17223/19988591/43/9

И.А. Лиханова, В.А. Ковалева

Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, Россия

Управляемое восстановление лесных экосистем на песчаных техногенных субстратах крайнесеверной тайги Европейского северо-востока России

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИБ Коми НЦ УрО РАН «Выявление общих закономерностей формирования и функционирования торфяных почв на территории Арктического и Субарктического секторов Европейского северо-востока России» (AAAA-A17-117122290011-5)

Приведены данные по восьмилетней динамике искусственного фитоценоза, почвы и почвенного микробоценоза, формирующихся на песчаных техногенных субстратах в биоклиматических условиях крайнесеверной тайги Европейского северо-востока России после применения традиционной (посадка древесных растений без дополнительных агроприемов) и оптимизированной (посадка древесных растений с посевом трав и внесением удобрений) технологий лесной рекультивации. Показана целесообразность сочетания посадки древесных растений и создания искусственного травостоя при обязательном управлении его развитием в последующем. Для закрепления техногенного субстрата, накопления органического материала, с одной стороны, и удовлетворительного роста древесных растений – с другой, целесообразно создание травостоя с наземной фитомассой в пределах 150–200 г/м². Биологический способ улучшения субстрата позволяет к восьмому году управляемой сукцессии аккумулировать более 780 г/м² органического вещества на/в почве рекультивированного участка. Значительно снизить риски при формировании древесного яруса в посттехногенных экосистемах позволяет использование крупномерного посадочного материала местного происхождения, высаживаемого на рекультивируемой территории с комом земли.

Ключевые слова: *Pinus sylvestris*; лесная рекультивация; управляемая сукцессия; искусственный травостой; песчаный техногенный субстрат; экосистема; почвенный микробоценоз.

Введение

В связи с увеличением площади нарушенных земель на севере таежной зоны европейской части России требуется разработка результативных технологий их восстановления. К настоящему времени основным и наиболее

разработанным приемом рекультивации в данном регионе стал метод «залужения» – искусственного создания на техногенных территориях травянистых сообществ [1–3]. Лесная рекультивация на нарушенных землях северных регионов исследована недостаточно. Первые опыты по посадке культур на нарушенных землях Европейского Севера начаты Л.П. Капелькиной [4], В.И. Парфенюком [5], однако эти и более поздние публикации [6, 7] дают отрывочные данные об управляемом восстановлении лесных экосистем на нарушенных землях таежной зоны Европейского Севера. В имеющиеся региональные руководства по биологической рекультивации на северо-востоке европейской части России мероприятия по посадке древесных растений не включены, основное внимание в них уделено созданию травянистых экосистем [8, 9]. Однако в последнее время многими исследователями подчеркивается важность восстановления экологических функций экосистем на нарушенных землях [10, 11]. В таежной зоне это может быть достигнуто за счет формирования на техногенно нарушенных территориях лесных экосистем, сходных по своему строению с природными экосистемами, уничтоженными в результате антропогенной деятельности [12]. Применение метода «залужения» недостаточно для решения задачи формирования на посттехногенных территориях древесного яруса. Более того, в ряде случаев развитый травостой может быть фактором, ограничивающим внедрение в сообщество древесных растений [13]. С другой стороны, традиционная технология лесорекультивационных работ, предусматривающая посадку только древесных растений [12], малоэффективна в целях защиты нарушенных земель от эрозии. В связи с этим исследователи рекомендуют в мероприятия по лесной рекультивации включать посев трав [13, 14]. Отмечено благоприятное влияние посевов колосняка песчаного на культуры сосны, созданные на песчаных пустошах Кольского полуострова [15]. Включение посева многолетних трав в комплекс лесорекультивационных работ широко используется для нарушенных территорий восточной части США [14]. Травосеяние позволяет прекратить эрозионные процессы, активизировать процессы почвообразования и развития почвенного микробного сообщества [16]. Однако густые покровы травянистых растений могут неблагоприятно влиять на рост высаженных древесных растений из-за конкуренции, снижать биоразнообразие и препятствовать накоплению биомассы в формирующихся экосистемах [17, 18]. Более оптимальным считается применение местных видов трав, по сравнению с интродуцированными [19]. Для биологической рекультивации используются как сеянцы, так и крупномерный посадочный материал – саженцы и дички древесных пород [7, 16, 20].

Цель работы – обосновать целесообразность применения в биоклиматических условиях крайнесеверной тайги оптимизированной технологии лесной рекультивации нарушенных земель, заключающейся в посадке древесных пород одновременно с созданием искусственного травостоя из многолетних злаков.

Материалы и методики исследования

Экспериментальные работы проведены на территории Усинского района Республики Коми (подзона крайнесеверной тайги, Европейский северо-восток России). Выбор района исследований обусловлен как активизацией в последние годы его промышленного освоения, так и суровостью природно-климатических условий, усложняющих процессы лесовосстановления на рекультивируемых территориях. Среднегодовая температура воздуха $-3,2^{\circ}\text{C}$. На водоразделах господствуют разреженные еловые и елово-березовые леса. Небольшими массивами располагаются сосняки. Сомкнутость крон 0,3–0,5, высота 8–15 м, бонитет – преимущественно Va [21]. Лесные экосистемы находятся здесь на северной границе своего распространения и поэтому крайне неустойчивы.

Полевой опыт заложен в 2006 г. на типичном техногенном объекте – песчаном карьере площадью 32 га ($66^{\circ}16'43''\text{N}$, $57^{\circ}16'41''\text{E}$). Карьер разработан на территории березово-елового бруснично-зеленомошного леса с примесью сосны и лиственницы. Почвенный покров представлен подзолами иллювиально-железистыми. Оработка карьера закончена в 1984 г. В 1986 г. после технической рекультивации, включающей планировку поверхности, большая часть карьера оставлена под самозарастание. За двадцатилетний период самовосстановления растительный покров на площадке карьера не сформировался. Песчаный субстрат (содержание частиц мелкого песка 80%, крупного песка 10–11%, физической глины 5–7%) легко перевивался под действием воздушных потоков. Содержание в нем органического углерода (менее 0,1%), азота (менее 0,01%) и оксида калия (2,2–3,2 мг/100 г в.с.п.) низкое, величина pH близка к нейтральной. Верхний десятисантиметровый слой субстрата отличался низкой полевой влажностью (3–4%), сильной контрастностью температур. Неблагоприятные свойства субстрата в сочетании с суровыми биоклиматическими условиями определяют крайне медленное самозарастание песчаных обнажений антропогенного происхождения лесотундры и северной тайги [22].

В опыте испытывали две технологии лесной рекультивации: 1) традиционную (с посадкой древесных растений без дополнительных агроприемов) и 2) оптимизированную (с посадкой древесных растений, сопровождающейся одновременным посевом трав и внесением удобрений). В качестве посадочного материала использовали сеянцы и дички сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в связи с её засухоустойчивостью и малой требовательностью к почвенному плодородию [23]. Опыт включал 6 вариантов (табл. 1) [24]. В вариантах 1–4 высаживали 2-летние сеянцы из Удорского лесхоза высотой $4,6 \pm 0,2$ см с открытой корневой системой с размещением – 1×2 м. В вариантах 5–6 использованы 7–15-летние дички высотой $50,6 \pm 4,9$ (вар. 5) – $54,7 \pm 6,2$ см (вар. 6), изъятые на сильно нарушенных краевых участках близлежащего леса с комом земли $30 \times 30 \times 20$ см и фрагментами напочвен-

ного покрова и сразу же высаженные на опытные делянки с размещением 2×2 м. В вариантах 1–4 на опытные делянки высаживалось по 45 семян, в 5–6 – по 24 дичка, повторность трехкратная. Варианты 1, 6 включали только посадку сосны. В вариантах 2–5 одновременно с посадкой вносили комплексное минеральное (азофоска из расчета 60 кг д.в./га по азоту, фосфору и калию) и органическое («БИАК» – биологически активный компост, продукт биотехнологической переработки гидролизного лигнина – в дозе 5 т/га, либо лесная подстилка в дозе 3 т/га) удобрения, а также проводили посев травосмеси многолетних злаков (*Poa pratensis* L., *Festuca rubra* L., *Festuca pratensis* Huds., *Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub, *Phleum pratense* L. в равных соотношениях при норме высева семян 20 кг/га). Посев трав осуществляли поверхностно с последующим прикатыванием. Система ухода в вариантах с посадкой семян (1–4) включала дополнение культур на второй и третий год после закладки опыта, в вариантах с посевом трав (2–5) – внесение минеральных подкормок на второй – пятый годы (табл. 1), а также подсев трав в местах выдува семян на второй год. В контрольном варианте никаких рекультивационных мероприятий не проводили.

Таблица 1 [Table 1]

**Схема опыта по отработке приемов управляемого
восстановления лесных экосистем**

[Experiment scheme of using techniques for controlled restoration of forest ecosystems]

Вариант, № [Trial]	Посадочный материал [Planting material]	Посевной материал [Seed material]	Внесение удобрений [Fertilizers]	Уход [Care]		
				Дополнение [Addition]	Подкормки [Top-dressing]	
					Весенние [Spring]	Осенние [Autumn]
Традиционная технология (посадка древесных растений без дополнительных агроприемов) [Traditional technology (planting of woody plants without additional agro-practices)]						
1	Сеянцы [Seedlings]	–	–	+	–	–
6	Дички [Wildings]	–	–	–	–	–
Оптимизированная технология (посадка древесных растений с созданием искусственного травостоя) [Optimized technology (planting of woody plants with creation of artificial grass)]						
2	Сеянцы [Seedlings]	Травосмесь [Grass mixture]	N60P60K60, «БИАК» ["BIAC"]	+	На 2–5-й гг. N45P45K45 [for 2-5 years]	На 2-й г. – N45 [for 2 year], на 3-й г – N45P 45K45 [for 3 year]

Окончание табл. 1 [Table 1 (end)]

Вариант, № [Trial]	Посадочный материал [Planting material]	Посевной материал [Seed material]	Внесение удобрений [Fertilizers]	Уход [Care]		
				Дополнение [Addition]	Подкормки [Top-dressing]	
					Весенние [Spring]	Осенние [Autumn]
3	-/-/-	-/-/-	N60P60K60, Подстилка [Litter]	+	-/-/-	-/-/-
4	-/-/-	-/-/-	-/-/-	+	На 2-й, 4-й г. N45P45K45 [for 2, 4 years] на 3-й, 5-й г. N45 [for 3,5 years]	–
5	Дички [Wildings]	-/-/-	-/-/-	–	-/-/-	–

Примечание. «+» – агротехническое мероприятие проводилось; «–» – не проводилось.

[Note. + an agrotechnical event was conducted; - an agrotechnical event was not conducted].

За восьмилетний период наблюдений в вариантах опыта оценивали динамику биометрических параметров посадок древесных пород [25] и их фитопатологическое состояние [26]. Ежегодно у всех выживших растений измеряли высоту, диаметр стволика, ширину кроны, степень пораженности грибными заболеваниями и энтомовыми вредителями. Сохранность рассчитывалась как доля выживших растений. Ежегодно определяли проективное покрытие и среднюю высоту травостоя. Надземную фитомассу учитывали методом укосов, подземную фитомассу – методом монолитов в пятикратной повторности [27]. В образцах почвогрунтов определяли pH водной вытяжки потенциометрически, содержание органического углерода и азота – методом газовой хроматографии; подвижных форм соединений калия и фосфора – методом Кирсанова; обменных оснований (Ca^{2+} , Mg^{2+}) – вытеснением $1\text{н NH}_4\text{Cl}$ с последующим атомно-абсорбционным определением [28]. Названия почв даны в соответствии с «Классификацией и диагностикой почв России» [29]. Численность почвенных микроорганизмов определяли методом разведения почвенной суспензии с последующим высевом ее на твердые питательные среды. Микроорганизмы-аммонификаторы учитывали на среде МПА (мясо-пептонный агар), минерализаторы азота – на КАА (крахмало-аммиачный агар), олиготрофы – на голодном агаре, олигонитрофилы – на среде Эшби, грибы – на подкисленной среде Чапека [30]. Проведена статистическая обработка полученных результатов. Вычислены средние арифметические значения изучаемых параметров, их ошибки и границы доверительных интервалов. Для оценки значимости различий биометрических параметров сосны в вариантах опыта использовали непараметрические критерии Краскела–Уоллиса и Уилкоксона при $p=0,05$ [24].

Результаты исследования и обсуждение

Рассмотрим формирование древесного яруса в вариантах опыта при применении разного посадочного материала. В культурах сеянцев сосны (вар. 1–4) приживаемость / сохранность ежегодно сокращалась, стабилизируясь на шестой год только в вариантах с посевом трав (табл. 2). В первые годы после посадки из-за небольших размеров сеянцев некоторая их часть (около 10%) погребена песком в результате ветровой эрозии. Фактором, еще сильнее повлиявшим на культуры, стал патогенный: заражение сосны грибами *Phacidium infestans* Karst и *Lophodermium seeditiosum* Mint. Распространенность болезней типа шютте в культурах сеянцев варьировала по годам наблюдений от 20–30% (вар. 2–4) до 40% (вар. 1). При этом порядка 87% погибших экземпляров сосны имели признаки грибного поражения ассимиляционного аппарата. Поражение сосны энтомовредителями отмечалось только на четвертый год опыта, когда 8% растений потеряли хвою из-за лжегусениц пилильщика-ткача (*Acantholyda hieroglyphica* Christ.). Значительное ослабление сосны вызывало физиологическое иссушение хвои. Те же причины гибели сосны отмечены при лесомелиорации Кузоменских песков Кольского полуострова [15].

Таблица 2 [Table 2]

Динамика приживаемости / сохранности (% от общего количества сеянцев / дичков) культур сосны в вариантах опыта (цифрами отмечены варианты опыта в соответствии с табл. 1)
[Survival/safety dynamics (% of the total number of seedlings/wild seedlings) of pine cultures in trials (numbers indicate the trials in accordance with Table 1)]

Вариант, № [Trial]	Посадочный материал [Planting material]	Годы опыта [Years of the experiment]						
		2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й
1	Сеянцы [Seedlings]	85	83	54	54	27	27	12
2		93	73	42	42	22	22	22
3		82	78	58	38	33	31	31
4		78	67	49	45	42	42	42
5	Дички [Wildings]	100	100	96	96	96	96	96
6		100	100	96	92	92	92	92

По мере роста высаженных сеянцев наблюдалось усиление дифференциации биометрических показателей культур между вариантами опыта (табл. 3). Максимальными значениями показателей характеризовались культуры сосны в варианте 4. По высоте стволика сосны различия стали статистически значимыми начиная с четвертого года наблюдений, по его диаметру – с шестого года опыта, по диаметру кроны – с седьмого. Темпы роста деревьев в варианте 4 сопоставимы с темпами роста культур сосны на вырубках северотаежных сосняков лишайниковых, в вариантах 1–3 они значительно ниже [31].

Таблица 3 [Table 3]

**Динамика биометрических показателей культур сосны
в вариантах опытов с посадкой сеянцев (1–4)**
[Dynamics of biometric parameters of pine cultures in trials with planting seedlings (1-4)]

Вариант, № [Trial]	Годы опыта [Years of the experiment]							
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й
Высота, см [Height, cm]								
1	4,3±0,3	5,6±0,5	9,9±1,1	14,5±2,1	18,6±3,1	22,4±3,2	28,0±5,7	31,8±10,1
2	4,5±0,3	5,7±0,8	10,6±1,8	14,7±2,9	16,7±4,6	23,2±4,3	28,5±5,3	32,8±8,8
3	4,6±0,5	5,4±0,6	8,6±1,3	12,5±2,4	15,0±1,4	20,3±3,2	27,5±5,5	30,3±7,7
4	4,3±0,3	6,3±0,6	10,1±0,8	17,7±2,5	22,4±3,2	28,9±5,0	38,9±5,6	50,3±7,5
H	2,2	4,5	6,4	9,2	9,6	8,3	8,6	12,9
p	0,516	0,213	0,092	0,026*	0,022*	0,040*	0,035*	0,005*
Диаметр стволика у корневой шейки, см [Stipitate diameter at the root neck, cm]								
1	0,1±0,0	0,1±0,0	0,3±0,0	0,5±0,1	0,6±0,1	0,7±0,2	0,9±0,2	0,9±0,4
2	0,1±0,0	0,1±0,0	0,3±0,1	0,5±0,1	0,6±0,1	0,8±0,2	0,9±0,2	0,9±0,3
3	0,1±0,0	0,1±0,0	0,3±0,1	0,4±0,1	0,6±0,1	0,7±0,2	0,8±0,3	0,9±0,2
4	0,1±0,0	0,1±0,0	0,3±0,1	0,5±0,1	0,7±0,1	0,9±0,1	1,1±0,2	1,3±0,2
H	5,0	4,2	3,96	6,2	4,3	7,8	7,9	8,5
p	0,172	0,245	0,276	0,100	0,228	0,050*	0,048*	0,037*
Ширина кроны, см [Crown diameter, cm]								
1	–	–	–	–	11,7±2,5	13,2±3,5	14,1±3,5	21,8±9,8
2	–	–	–	–	9,7±5,3	12,4±5,0	14,4±3,7	22,3±7,2
3	–	–	–	–	8,0±2,8	10,5±4,9	12,9±5,4	19,5±6,4
4	–	–	–	–	14,3±4,8	16,1±2,5	22,3±4,3	40,6±7,7
H	–	–	–	–	6,45	5,6	11,3	15,9
p	–	–	–	–	0,091	0,135	0,010*	0,001*

Примечание. Приведены средние арифметические значения и доверительные интервалы при $p = 0,05$; H – критерий Краскелла–Уоллиса; p – уровень значимости; * – отличия статистически значимы при $p = 0,05$; прочерк – крона не сформирована.

[Note. Arithmetic mean values and confidence intervals at $p=0.05$; H - Kraskella-Wallace's criterion; p - level of significance; *differences are reliable at $p=0.05$; the dash-crown is not formed].

Таблица 4 [Table 4]

**Значимость различий биометрических параметров сосны между вариантами
опыта с посадкой сеянцев (1–4) на восьмой год опыта (критерий Уилкоксона)**
[Significance of differences in pine biometric parameters between the trials
with planting seedlings (1-4) for the eighth year of the experiment (Uilkokson's criterion)]

Сравниваемые варианты [Compared trials]	Высота, см [Height]		Диаметр стволика, см [Stipitate diameter]		Ширина кроны, см [Crown diameter]	
	U	p	U	p	U	p
1–2	17,0	0,931	20,0	0,941	20,0	0,940
1–3	31,5	0,910	25,0	0,622	27,0	0,580
1–4	38,5	0,036*	51,5	0,121	35,0	0,024*
2–3	29,5	0,760	29,5	0,623	30,5	0,497
2–4	40,5	0,044*	60,0	0,101	41,5	0,017*
3–4	60,5	0,003*	68,5	0,014*	51,0	0,001*

Примечание. U – критерий Уилкоксона; p – уровень значимости; * – отличия статистически значимы при $p = 0,05$.

[Note. U - Uilkokson's criterion; p - level of significance; *differences are reliable at $p = 0.05$].

В вариантах 5–6 с посадками культур дичков наблюдалась высокая сохранность (см. табл. 1). Качественный крупномерный посадочный материал оказался устойчив к прессу абиогенных и биогенных факторов. Распространенность болезней типа шютте, как правило, не превышала 12%. Основные причины отпада единичных растений – болезни типа шютте и удущье, вызываемое *Thelephora terrestris* Ehrh. Минимальный прирост в высоту дичков отмечен на второй год после посадки, в последующем темпы роста неуклонно возрастали (табл. 5). Различия между культурами в вариантах с посадкой дичков сосны статистически не значимы. Однако необходимо отметить тенденцию к ускорению роста сосны в варианте 5 с улучшением свойств техногенного субстрата (посев трав и внесение удобрений) по сравнению с вариантом 6 (см. табл. 5).

Таблица 5 [Table 5]

**Динамика биометрических показателей культур
сосны в вариантах опытов с посадкой дичков**

[Dynamics of biometric parameters of pine cultures in the trials with planting wildlings]

Вариант, № [Trial]	Год опыта [Year of the experiment]							
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й
Высота, см [Height, cm]								
5	59,8±5,3	60,9±5,8	69,0±6,6	79,7±6,1	96,7±9,1	116,4±10,7	136,6±12,9	161,1±17,0
6	65,6±5,8	67,6±4,9	77,0±5,9	87,7±5,9	97,8±7,4	112,2±10,2	130,2±12,7	149,6±14,2
Диаметр стволика у корневой шейки, см [Stipitate diameter at the root neck, cm]								
5	1,5±0,2	1,5±0,1	1,7±0,2	1,9±0,2	2,3±0,3	2,8±0,3	3,3±0,4	3,8±0,4
6	1,6±0,2	1,6±0,2	1,8±0,2	2,0±0,2	2,3±0,2	2,8±0,2	3,3±0,3	3,7±0,4
Диаметр кроны, см [Crown diameter, cm]								
5	36,2±3,2	36,8±3,3	46,4±4,7	50,4±4,9	56,7±6,0	65,2±6,6	75,1±8,4	86,9±8,4
6	39,7±3,4	40,8±3,8	49,0±4,6	52,3±5,3	58,1±5,9	64,0±6,0	72,8±7,0	85,4±7,5

Примечание. Приведены средние арифметические значения и доверительные интервалы при $p = 0,05$.

[Note. Arithmetic mean values and confidence intervals at $p=0.05$].

У восьмилетних культур сосны, созданных посадкой семян, наблюдается высокая изменчивость таксационных показателей (табл. 6), у культур, созданных посадкой дичков, – средняя, что можно объяснить не только возрастом древесных растений, но и лучшей их приспособляемостью к экстремальным условиям посттехногенной территории [31]. Успешность посадки дичков, по-видимому, связана с местным происхождением сосны, оптимальной высотой посадочного материала, целостностью кома земли, минимальным промежутком времени между выкапыванием растений и их пересадкой.

Таблица 6 [Table 6]

Таксационные показатели опытных восьмилетних рекультивационных культур
[Taxation parameters of experimental eight-year reclamation cultures]

Вариант, № [Trial]	Высота, см [Height]				Диаметр стволика, см [Stipitate diameter]				Ширина кроны, см [Crown diameter]			
	$M \pm m_M$	Min-max	σ	C_v	$M \pm m_M$	Min-max	σ	C_v	$M \pm m_M$	Min-max	σ	C_v
Культуры, созданные посадкой семянцев [Cultures, created by planting seedlings]												
1	31,8 $\pm 3,9$	17–47	10,1	30,5	0,9 $\pm 0,1$	0,5–1,3	0,37	39,7	21,8 $\pm 3,8$	12–37	9,3	42,6
2	32,8 $\pm 3,9$	20–47	9,6	29,0	0,9 $\pm 0,1$	0,5–1,3	0,31	33,3	22,3 $\pm 3,1$	10–35	8,3	37,2
3	30,3 $\pm 3,6$	18–50	11,8	39,3	0,9 $\pm 0,1$	0,5–1,4	0,26	30,5	19,5 $\pm 3,0$	7–39	9,8	50,5
4	50,3 $\pm 3,7$	20–95	19,8	39,1	1,3 $\pm 0,1$	0,5–2,6	0,57	44,1	40,6 $\pm 3,8$	14–89	20,3	49,9
Культуры, созданные посадкой дичков [Cultures, created by planting wildlings]												
5	161,1 $\pm 8,3$	89–230	40,5	25,1	3,8 $\pm 0,2$	1,9–5,1	0,94	24,7	86,9 $\pm 4,1$	41–123	19,7	22,7
6	149,6 $\pm 6,9$	96–223	34,4	23,0	3,7 $\pm 0,2$	2,1–4,9	0,85	24,1	85,4 $\pm 3,6$	50–121	17,4	20,4

Примечание. M – средний диаметр, см; m_M – стандартная ошибка среднего диаметра, см; Min-max – максимальное и минимальное значения параметра; σ – среднее квадратичное отклонение от среднего диаметра, см; C_v – коэффициент вариации, %.

[Note. M - mean diameter, cm; m_M - standard error of the mean diameter, cm; Min-max - maximum and minimum parameter value; σ - standard deviation from the mean diameter, cm; C_v - coefficient of variation, %]

На контрольном участке и в вариантах опыта с применением традиционной технологии (1, 6) в течение рассматриваемого периода в напочвенном покрове зафиксировано внедрение только единичных пионерных и ксерофильных видов (*Equisetum arvense* L., *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop, *Festuca ovina* L.). В варианте 6, помимо них, отмечены также кустарнички (*Empetrum hermaphroditum* (Lange) Hagerup, *Vaccinium uliginosum* L., *V. vitis-idaea* L.), которые сохранились на комьях земли, привнесенных при посадке дичков. В вариантах с оптимизированной технологией проведения рекультивационных работ (вар. 2–5) применение агротехнических приемов, включающих посев трав, позволило в короткие сроки сформировать травянистый покров с доминированием овсяницы красной (*Festuca rubra*). В период ухода проективное покрытие трав последовательно возрастало, достигнув максимума на пятый год опыта, затем с прекращением внесения удобрений стало быстро сокращаться и к концу наблюдений составило всего около 10–15% (рис. 1). Начиная с третьего года проведения работ и до окончания внесения минеральных подкормок высеянные злаки, за исключением овсяницы луговой (*Festuca pratensis*), проходят полный цикл развития. Высота их вегетативных побегов достигает 50 см, генеративных – 80 см. С прекращением ухода высота злаков уменьшилась до 10–20 см, при этом во всех вариантах опыта присутствовали только вегетативные побеги. Аналогичную картину

медленного развития искусственных травостоев и их быструю деградацию без внесения удобрений отмечали Н.И. Подлесная и В.Н. Переверзев [32] на нефелиновых песках Кольского полуострова.

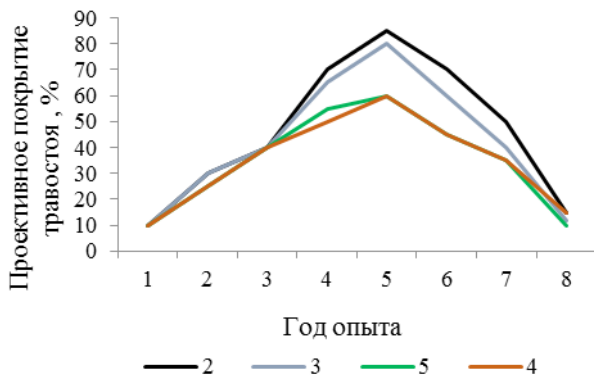


Рис. 1. Динамика проективного покрытия травостоя в вариантах опыта (2...5)

[Fig. 1. Dynamics of the projective cover of the grass stand (2...5).

On the X-axis - Year of the experiment; on the Y-axis - Projective cover of the grass stand]

Динамика проективного покрытия искусственного травостоя коррелирует с динамикой наземной фитомассы (рис. 2, а). В вариантах 4 и 5 фитомасса искусственного травостоя в пик ее развития составила 170 и 189 г/м² соответственно, в вариантах 2 и 3 – в 1,4–1,8 раза выше, что может быть обусловлено дополнительными осенними подкормками травостоев минеральными удобрениями. Несмотря на снижение в последующие годы живой наземной фитомассы, на опытных участках наблюдалось постепенное возрастание величины мортмассы (рис. 2, б) и общей подземной фитомассы (рис. 2, с). В начале опыта соотношение общей подземной к общей наземной фитомассе составляло около 1, в конце наблюдений оно увеличилось до 2,5 (вар. 2, 3) – 3,5 (вар. 4, 5).

Уже в первые годы опыта в искусственный травостой начинают внедряться местные растения (апофиты). Сначала это единичные сорные одно-двулетники (*Tripleurospermum perforatum* (Merat.) M.Lainz, *Crepis tectorum* L. и др.). На второй–третий годы опыта появляются корневищные и корнеотпрысковые многолетники (*Equisetum arvense*, *Chamaenerion angustifolium* и др.) и задерживающие злаки (*Festuca ovina*, *Calamagrostis epigeios* (L.), *Agrostis tenuis* Sibth., *Deschampsia cespitosa* (L.) P. Beauv. и др.). Последние зафиксированы нами во все годы наблюдений при незначительной величине их проективного покрытия. В вариантах 2 и 3 на второй год опыта насчитывалось 4 вида внедрившихся сосудистых растений, с третьего по восьмой – по 6–5 видов. В варианте 4 на второй год – 4 вида, на третий – четвертый годы – по 5, на пятый – восьмой – 7–9. Максимальное видовое разнообразие сосудистых растений (без учета видов сеяных трав) отмечено в варианте

5: в первые два года – 9–10, на третий – пятый – 12, на шестой – седьмой – 15–17 видов, что связано с развитием части из них в составе фрагментов напочвенного покрова, внедренных на участок при посадке дичков с комом земли (*Empetrum hermaphroditum*, *Vaccinium vitis-idaea*, *V. uliginosum*, *V. myrtillus* L., *Antennaria dioica* (L.) Gaertn. и др.). Со второго года опыта во всех вариантах отмечена протонема мхов. К концу наблюдений, в зависимости от силы подавления мхов искусственным травостоем, в вариантах 2, 3, 4, 5 проективное покрытие мохового яруса из пионерных *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid. и *Polytrichum piliferum* Hedw. составляло 30, 50, 60, 70 %, при массе живых мхов 10, 28, 32, 39 г/м² соответственно. Выявленные нами на опытных участках виды мхов и сосудистых растений – активные пионеры зарастаний нарушенных земель [33–35].

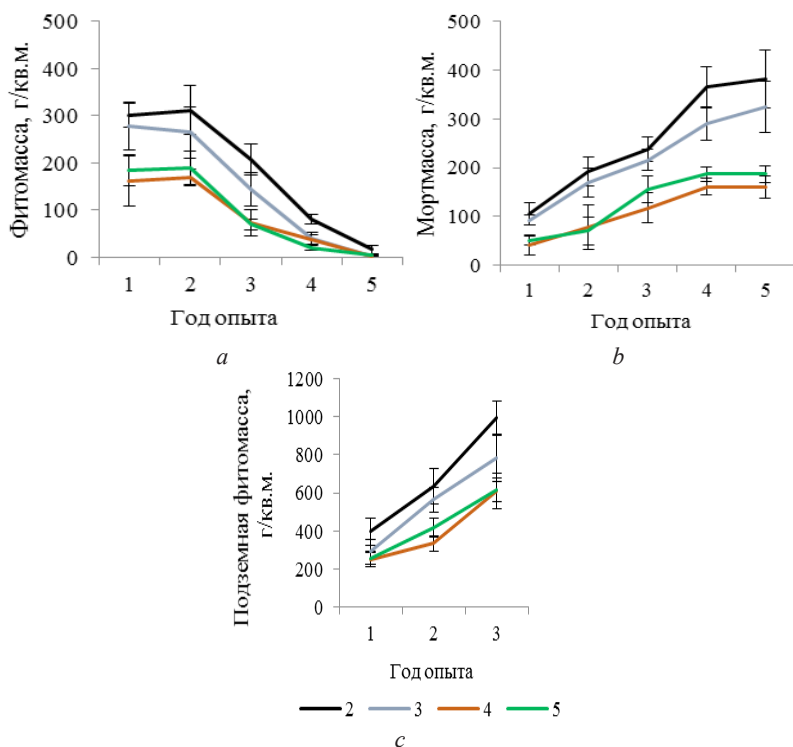


Рис. 2. Динамика живой (a) и отмершей (b) наземной фитомассы и общей подземной фитомассы (c) (г/м² абс. сух. вещества) искусственного травостоя по годам в вариантах опыта. Пределы погрешности отражают величину ошибки среднего арифметического значения

[Fig. 2. Dynamics of live (a) and dead (b) phytomass and total underground phytomass (c) (g/m² of absolutely dry matter) of the artificial grass stand by years. The limits of error reflect the magnitude of the error of the mean of the arithmetic mean. On the Y-axis - Live phytomass, g/m² (a); dead phytomass, g/m² (b); underground phytomass, g/m² (c); on the X-axis - Year of the experiment]

Морфологические и агрохимические свойства (табл. 7) субстрата в ходе опыта не изменились в вариантах с применением традиционной технологии и на контрольном участке, в связи с крайне незначительным поступлением органического материала в песчаный грунт. В вариантах с оптимизированной технологией рекультивации, включающей создание искусственного травостоя, уже к пятому году опыта на поверхности субстрата отмечено формирование рыхлого слоя ветоши, под ним – пронизанного корнями травянистых растений одернованного слоя. К восьмому году опыта существование искусственного травостоя позволило аккумулировать порядка 780 г/м² и более растительного материала (в расчете на абсолютно сухую массу) в форме суммарного запаса надземной и подземной фитомасс. Его включение в процессы трансформации и гумусообразования способствовало формированию слабо развитого гумусового горизонта W, характерного для псаммоземов гумусовых типичных. В гумусово-слабо развитом горизонте и залегающем под ним корнеобитаемом слое (глубина 5–10 см от поверхности формирующейся почвы) аккумулируются элементы-биогены и органические соединения (см. табл. 7). В вариантах с созданием травостоя отмечено прекращение эрозионных процессов, полевая влажность почв характеризуется величинами порядка 6–14%. Формирование искусственного травостоя как способ улучшения техногенного субстрата может быть рекомендован при отсутствии возможности применения более эффективных в целях ускорения восстановительной сукцессии приемов: нанесения на техногенную площадь 10-сантиметрового слоя торфа или 20–50-сантиметрового органо-минерального слоя [19, 36].

Таблица 7 [Table 7]

Агрохимические показатели субстрата / почвы на седьмой год опыта
[Agrochemical parameters of the substrate / soil in the seventh year of the experiment]

Горизонт [Horizon]	Глубина, см [Depth, cm]	pH	C, %	N, %	Подвижные формы [Mobile forms]		Обменные формы [Exchange forms]	
					P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca ²⁺	Mg ²⁺
					мг/100г в.с.п. [mg/100 g]		смоль/кг [smol/kg]	
Контроль. Нулевая стадия почвообразования [Control. Zero stage of soil formation]								
C	0–5	5,6	<0,1	<0,01	8,7±1,3	3,23±0,5	0,65±0,11	0,26±0,03
C	5–10	5,7	<0,1	<0,01	10,1±1,5	3,23±0,5	0,51±0,09	0,24±0,02
C	10–20	5,6	<0,1	<0,01	9,5±1,5	2,45±0,4	0,45±0,08	0,23±0,02
Традиционная технология (посадка древесных растений без дополнительных агроприемов) [Traditional technology (planting of woody plants without additional agro-practices)]								
Вариант 1. Нулевая стадия почвообразования [Trial 1. Zero stage of soil formation]								
C	0–5	6,1	<0,1	<0,01	10,8±1,6	2,2±0,3	0,51±0,09	0,22±0,02
C	5–10	6,1	<0,1	<0,01	11,4±1,7	2,2±0,3	0,52±0,09	0,23±0,02
C	10–20	5,8	<0,1	<0,01	11,7±1,8	2,2±0,3	0,49±0,08	0,25±0,03

Окончание табл. 7 [Table 7 (end)]

Гори- зонт [Hori- zon]	Глуби- на, см [Depth, cm]	pH	C, %	N, %	Подвижные формы [Mobile forms]		Обменные формы [Exchange forms]	
					P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca ²⁺	Mg ²⁺
					мг/100г в.с.п. [mg/100 g]		смоль/кг [smol/kg]	
Оптимизированная технология (посадка древесных рас- тений с созданием искусственного травостоя) [Optimized technology (planting of woody plants with creation of artificial grass)]								
Вариант 2. Почва: псаммозем гумусовый типичный [Trial 2. Soil: typical humic psammozem]								
W	0–1(2)	5,9	0,23± 0,05	0,021± 0,006	18,4±2,8	12,2±1,2	0,42±0,07	0,14±0,03
C	2–5	5,9	0,12± 0,03	0,016± 0,004	19,9±3,0	10,5±1,6	0,32±0,05	0,09±0,02
C	5–10	5,8	<0,1	0,012± 0,003	12,0±1,8	6,7±1,0	0,40±0,07	0,10±0,02
C	10–20	5,7	<0,1	<0,01	13,0±2,0	2,5±0,4	0,57±0,10	0,17±0,03
C	20–30	6,0	<0,1	<0,01	14,3±2,2	3,4±0,5	0,42±0,07	0,14±0,03
Вариант 5. Почва: псаммозем гумусовый типичный [Trial 5. Soil: typical humic psammozem]								
W	0–1(2)	5,8	0,18± 0,04	0,020± 0,006	19,7±3,0	12,9±1,3	0,91±0,15	0,25±0,03
C	2–5	6,1	0,10± 0,02	0,016± 0,004	13,0±2,0	8,0±1,2	0,82±0,14	0,15±0,03
C	5–10	6,0	<0,1	0,014± 0,003	7,8±1,2	6,0±0,9	0,86±0,15	0,17±0,03
C	10–20	6,1	<0,1	<0,01	9,8±1,5	5,6±0,8	0,71±0,12	0,23±0,02
C	20–30	5,9	<0,1	<0,01	9,8±1,5	3,2±0,5	0,45±0,08	0,24±0,02

Примечание. Приведены значения показателя с границами интервала абсолютной погрешности при $p = 0,05$.

[Note. Arithmetic mean values and confidence intervals at $p=0.05$].

На восьмой год опыта численность разных эколого-трофических групп микробоценоза субстрата варианта 1 с применением традиционной технологии лесной рекультивации по сравнению с исходным субстратом практически не изменилась (табл. 8). В связи с дефицитом питательных элементов, низким содержанием почвенного органического вещества и неблагоприятными гидротермическими условиями значительную роль в микробном сообществе продолжают играть олиготрофные и олигонитрофильные микроорганизмы. В вариантах 2 и 5 с применением оптимизированной технологии в верхнем органо-аккумулятивном слое выявлено увеличение общей численности почвенных микроорганизмов в 4–6 раз по сравнению с контролем и вариантом 1, при этом наиболее значительное увеличение численности отмечено среди микроорганизмов азотного цикла. Это свидетельствует об активном протекании процессов как минерализации, так и аккумуляции органического вещества в субстрате. Таким образом, развитие микробного сообщества взаимосвязано с формированием фитоценоза, определяющего фитосреду и поступление растительной морт-массы [37–39]. Сходная взаи-

мосьвязь численности почвенных микроорганизмов с развитием растительности техногенных местообитаний показана целым рядом исследователей [40–42].

Таблица 8 [Table 8]

Численность эколого-трофических групп микроорганизмов
(восьмой год опыта), тыс. КОЕ/г а.с.п.
[The number of ecological-trophic groups of microorganisms (the eighth year of the experiment), thousands of CFU / g of completely dry soil]

Глубина, см [Depth, sm]	Аммонификаторы [Ammonifying agents]	Минерализаторы азота [Nitrogen mineralizers]	Олиготрофы [Oligotrophs]	Олигонитрофилы [Oligonitrophils]	Микромицеты [Mycromycetes]
Исходный песчаный субстрат [Initial sandy substrate]					
0–10	1091,2±104,9	942,0±88,9	1957,2±56,8	1642,0±111,0	–
Традиционная технология (посадка древесных растений без дополнительных агроприемов) [Traditional technology (planting of woody plants without additional agro-practices)]					
Вариант 1 [Trial 1]					
0–1	1294±62	768±70	1243±53	1597±76	40±2
1–5	706±103	539±66	830±240	743±35	2±1
5–10	448±65	206±11	306±81	345±35	–
10–20	39±5	22±3	15±6	21±2	–
Оптимизированная технология (посадка древесных растений с созданием искусственного травостоя) [Optimized technology (planting of woody plants with creation of artificial grass)]					
Вариант 2 [Trial 2]					
0–1	6347±615	4944±857	4409±341	4008±94	67±14
1–5	6187±710	6152±626	4657±54	4391±188	100±25
5–10	311±28	196±7	259±68	428±36	–
10–20	15±2	36±4	12±2	33±9	–
Вариант 5 [Trial 5]					
0–1	6805±198	7074±415	6468±191	7883±252	310±43
1–5	7469±429	6125±445	5719±177	7281±92	44±3
5–10	1288±51	1303±39	830±26	794±60	12±2
10–20	102±152	64±14	94±84	80±17	–

Примечание. Приведены средние арифметические значения и доверительные интервалы при $p = 0,05$. Прочерк – микроорганизмы не выделены.

[Note. Arithmetic mean values and confidence intervals at $p=0.05$. The dash - microorganisms are not isolated].

Создание искусственного травостоя из высейных многолетних злаков, несмотря на то, что использованные виды считаются малококонкурентоспособными по отношению к древесным растениям [14], несомненно, влияет на культуры сосны, созданные посадкой семян. Как показали наши наблюдения, в вариантах опыта с хорошо развитым травостоем (2, 3), наземная фитомасса которого в пик своего развития составляла около 300 г/м², а проективное покрытие – около 80%, биометрические показатели семян сосны не различались с таковыми в варианте опыта без посева трав (1). В вари-

анте опыта с умеренно развитым травостоем (4), величина наземной фитомассы которого не превышала 170 г/м^2 , а проективное покрытие – 60%, к концу наблюдений рассмотренные параметры состояния культур сосны оказались значимо выше, чем в других вариантах с посадкой семян (1–3). Следовательно, при посадке семян одновременно с посевом трав за счет агротехнических приемов создания и ухода (управления развитием травостоя) необходимо добиваться некоторого баланса конкурентных взаимоотношений между древесными растениями и травами в целях эффективного восстановления компонентов фитоценоза. Травостой наземной фитомассой более $150\text{--}200 \text{ г/м}^2$ и проекттивным покрытием более 60% тормозит рост семян и служит одной из причин их гибели, что подтверждается данными и других исследователей [18, 43]. Умеренно развитый травостой благоприятен для развития культур сосны, в связи со значительным улучшением свойств субстрата. Исследования подтвердили возможность положительного влияния посева многолетних злаков на высаженные деревья, отмеченного при рекультивации нарушенных земель Кольского полуострова [15] и восточной части США [14]. Снизить риски и ускорить темпы формирования древесного яруса возможно за счет посадки дичков с комом земли, в связи с их более крупными размерами, меньшим стрессом при пересадке, большей устойчивостью к прессу биогенных и абиогенных факторов. Формирование искусственного травостоя благоприятно влияет на рост крупномерного посадочного материала, что показано и другими авторами [18, 44].

Заключение

В целях активизации восстановительной сукцессии на техногенных песчаных субстратах необходимо проведение рекультивационных работ. В биоклиматических условиях крайнесеверной тайги целесообразно применение оптимизированной технологии лесной рекультивации нарушенных земель, включающей посадку древесных пород одновременно с созданием искусственного травостоя из многолетних злаков. Это обусловлено тем, что без дополнительных агроприемов посадка древесных растений в первые десятилетия управляемой сукцессии не обеспечивает закрепления песчаного субстрата, накопление органической массы, формирование напочвенного покрова. Применение оптимизированной технологии рекультивации при регулировании конкурентных взаимоотношений между компонентами искусственного фитоценоза позволяет одновременно ускорить формирование древесного яруса, напочвенного покрова, почвы и микробного комплекса.

Литература

1. Акульшина Н.П., Лобовиков Н.И., Менгалимов Х.Я. Опыт фитомелиорации эродированных почвогрунтов на трассе магистрального нефтепровода Возей–Уса–Ухта // Растительные ресурсы. 1981. Т. XVII, вып. 2. С. 175–183.

2. Биологическая рекультивация на Севере (Вопросы теории и практики) / отв. ред. И.Б. Арчегова. Сыктывкар : Коми НЦ УрО РАН, 1992. 104 с.
3. Турубанова Л.П., Лиханова И.А. Динамика растительности на посттехногенных территориях Усинского района Республики Коми при посеве разных видов многолетних трав // Сибирский экологический журнал. 2013. № 2. С. 223–233. doi: [10.1134/S1995425513020157](https://doi.org/10.1134/S1995425513020157)
4. Капелькина Л.П. Естественное и искусственное лесовозобновление на нарушенных землях Севера // Лесной журнал. 1983. № 1. С. 21–24.
5. Парфенюк В.И. Лесная рекультивация нарушенных земель в зоне крайнесеверной тайги Коми АССР // Освоение Севера и проблемы рекультивации : материалы I Междунар. конф. Сыктывкар, 1991. С. 155–156.
6. Соколов А.И., Федорен Н.Г., Кривенко Т.И., Лейбонен Е.Э., Новицкая Л.Л. Первичные этапы формирования биогеоценозов при разведении карельской березы на отвалах Костомукшского железорудного месторождения // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2010. Вып. 191. С. 2–31.
7. Федорец Н.Г., Соколов А.И., Крышень А.М., Медведева М.В., Костина Е.Э. Формирование лесных сообществ на техногенных землях севера-запада таежной зоны России. Петрозаводск : Карельский НЦ РАН, 2011. 130 с.
8. Рекультивация земель на Севере. Вып. 1. Рекомендации по рекультивации земель на Крайнем Севере / отв. ред. И.Б. Арчегова. Сыктывкар : Коми НЦ УрО РАН, 1997. 34 с.
9. Требования к технологиям рекультивации загрязненных нефтью земель. Сыктывкар : Комимелиоводхозпроект, 2014. 134 с.
10. Powter C.B., Chymko N.R., Dinwoodie G., Howat D., Janz A., Puhlmann R., Richens T., Watson D., Sinton H., Ball J.K., Etmanski A., Patterson D.B., Brocke L.K., Dyer R. Regulatory history of Alberta's industrial land conservation and reclamation program // Canadian Journal of Soil Science. 2012. № 92. PP. 39–51. doi: [10.4141/cjss2010-033](https://doi.org/10.4141/cjss2010-033)
11. Lima A.T., Mitchell K., O'Connell D.W., Verhoeven J., Cappellen P.V. The legacy of surface mining: Remediation, restoration, reclamation and rehabilitation // Environmental Science & Policy. 2016. № 66. PP. 227–233. doi: [10.1016/j.envsci.2016.07.011](https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.07.011)
12. Лиханова И.А., Арчегова И.Б. Развитие теоретических и практических аспектов процесса восстановления нарушенных земель на севере Республики Коми // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 3. С. 79–85.
13. Evans D.M., Zipper C.E., Burger J.A., Strahm B.D., Villamagna A.M. Reforestation practice for enhancement of ecosystem services on a compacted surface mine: Path toward ecosystem recovery // Ecological Engineering. 2013. № 51. PP. 16–23. doi: [10.1016/j.ecoleng.2012.12.065](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.065)
14. Zipper C.E., Burger J.A., Skousen J.G., Angel P.N., Barton C.D., Davis V., Franklin J.A. Restoring forests and associated ecosystem services on Appalachian coal surface mines // Environmental Management. 2011. № 47. PP. 751–765. doi: [10.1007/s00267-011-9670-z](https://doi.org/10.1007/s00267-011-9670-z)
15. Казаков Л.А., Вишняков Г.В., Чамин В.А. Лесомелиорация Кузоменских песков // Вестник Кольского научного центра РАН. 2011. № 2. С. 58–63.
16. Лиханова И.А., Арчегова И.Б., Хабибуллина Ф.М. Восстановление лесных экосистем на техногенно нарушенных территориях Севера. Екатеринбург : УрО РАН, 2006. 104 с.
17. Torbert J.L., Schoenholtz S.H., Burger J.A., Kreh R.E. Growth of three pine species on pre- and post-SMCRA land in Virginia // Northern Journal of Applied Forestry. 2000. № 17. PP. 95–99.
18. Skousen J., Ziemkiewicz P., Venable C. Tree recruitment and growth on 20-year-old, unreclaimed surface mined lands in West Virginia // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2006. № 20. PP. 142–154. doi: [10.1080/17480930600589833](https://doi.org/10.1080/17480930600589833)
19. Franklin J.A., Zipper C.E., Burger J.A., Skousen J.G., Jacobs D.F. Influence of herbaceous ground cover on forest establishment and growth on eastern US coal surface mines // New Forests. 2012. № 43. PP. 905–924. doi: [10.1007/s11056-012-9342-8](https://doi.org/10.1007/s11056-012-9342-8)

20. Вараксин Г.С., Кузнецова Г.В. Особенности биологической рекультивации в Норильском промышленном регионе // Сибирский лесной журнал. 2016. № 2. С. 92–101. doi: [10.15372/SJFS20160209](https://doi.org/10.15372/SJFS20160209)
21. Семенов Б.А., Цветков В.Ф., Чибисов Г.А., Елизаров Ф.П. Притундровые леса европейской части России. Архангельск : СевНИИЛХ, 1998. 332 с.
22. Капитонова О.А., Селиванов А.Е., Капитонов В.И. Структура растительных сообществ начальных стадий сукцессий на антропогенных песчаных обнажениях лесотундры и северной тайги Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. 2017. Т. 24, № 6. С. 731–745. doi: [10.15372/sej20170606](https://doi.org/10.15372/sej20170606)
23. Хватов Ю.А. Облесение земель, нарушенных при разработке месторождений полезных ископаемых. М. : ЦБНТИлесхоз, 1973. 56 с.
24. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М. : Агропромиздат, 1985. 351 с.
25. Огиевский В.В., Хиров В.В. Обследование и исследование лесных культур. М. : Лесн. пром-ть, 1964. 50 с.
26. Соколова Э.С., Ведерников Н.М. Указания по диагностике болезней хвойных пород в питомниках и молодняках. М. : Минлесхоз РСФСР, 1988. 77 с.
27. Методы изучения лесных сообществ / отв. ред. В.Т. Ярмишко, И.В. Лянгузова. СПб. : НИИХимии СПбГУ, 2002. 240 с.
28. Теория и практика химического анализа почв / отв. ред. Л.А. Воробьева. М. : ГЕОС, 2006. 400 с.
29. Классификация и диагностика почв России / отв. ред. Г.В. Добровольский. Смоленск : Ойкумена, 2004. 342 с.
30. Методы почвенной микробиологии и биохимии / отв. ред. Д.Г. Звягинцев. М. : Изд-во МГУ, 1991. 304 с.
31. Ларин В.Б., Паутов Ю.А. Формирование хвойных молодняков на вырубках северо-востока европейской части СССР. Л. : Наука, 1989. 144 с.
32. Подлесная Н.И., Переверзев В.Н. Фитомелиорация территорий, нарушенных промышленностью // Мелиорация земель Крайнего Севера. М. : Колос, 1977. С. 227–234.
33. Rahmonov O., Snytko V.A., Szczypek T., Parusel T. Vegetation development on post-industrial territories of the Silesian Upland (Southern Poland) // Geography and Natural Resources. 2013. № 34. PP. 166–173. doi: [10.1134%2FS1875372813010137](https://doi.org/10.1134%2FS1875372813010137)
34. Патова Е.Н., Кулюгина Е.Е., Денева С.В. Процессы естественного восстановления почв и растительного покрова на отработанном угольном карьере (Большеземельская тундра) // Экология. 2016. № 3. С. 173–179. doi: [10.7868/S0367059716020116](https://doi.org/10.7868/S0367059716020116)
35. Железнова Г.В., Шубина Т.П. Видовой состав мхов техногенно нарушенных ландшафтов Республики Коми // Ботанический журнал. 2005. Т. 90, № 2. С. 215–222.
36. Mackenzie D.D., Naeth M.A. The role of the forest soil propagule bank in assisted natural recovery after oil sands mining // Restoration Ecology. 2010. № 18. PP. 418–427. doi: [10.1111/j.1526-100X.2008.00500.x](https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2008.00500.x)
37. Lambers H., Mougél C., Jaillard B., Hinsinger P. Plant-microbe-soil interactions in the rhizosphere: an evolutionary perspective // Plant and Soil. 2009. Vol. 321, № 1–2. PP. 83–115. doi: [10.1007/s11104-009-0042-x](https://doi.org/10.1007/s11104-009-0042-x)
38. Dimitriu P.A., Prescott C.E., Quideau S.A., Grayston S.J. Impact of reclamation of surface-mined boreal forest soils on microbial community composition and function // Soil Biology and Biochemistry. 2010. Vol. 42, № 12. PP. 2289–2297. doi: [10.1016/j.soilbio.2010.09.001](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.09.001)
39. Parmelee R.W., Ehrenfeld J.G., Tate R.L. III. Effects of pine roots on microorganisms, fauna, and nitrogen availability in two soil horizons of a coniferous forest spodosol // Biology and Fertility of Soils. 1993. Vol. 15, № 2. PP. 115–119. doi: [10.1007/BF00336428](https://doi.org/10.1007/BF00336428)
40. Сумина О.И., Власов Д.Ю., Долгова Л.Л., Сафронова Е.В. Особенности формирования сообществ микромитозов в зарастающих песчаных карьерах севера Западной Сибири // Вестник СПбГУ. Сер. 3. Биология. 2010. Вып. 2. С. 84–90.

41. Евдокимова Г.А., Калмыкова В.В. Биологическая активность рекультивированных промышленных отвалов в условиях северной тайги // *Агрохимия*. 2008. № 1. С. 63–67.
42. Гордеева Т.Х., Малюта О.В. Динамика параметров биологической активности почвы как показатель почвенно-экологических условий на объекте рекультивации // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2010. № 2 (40). С. 34–36.
43. Маркова И.А. Основные факторы успешного роста лесных культур на северо-западе России // *Лесовосстановление на Европейском Севере : материалы научного семинара*. Хельсинки : Изд-во НИИ леса Финляндии, 2000. С. 183–193.
44. Luoranen J., Rikala R. Field performance of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings planted in disc trenched or mounded sites over an extended planting season // *New Forests*. 2013. № 44. PP. 147–162. doi: [10.1007/s11056-012-9307-y](https://doi.org/10.1007/s11056-012-9307-y)

*Поступила в редакцию 15.11.2017 г.; повторно 07.03.2018 г.; 08.05.2018 г.;
принята 23.08.2018 г.; опубликована 12.10.2018 г.*

Авторский коллектив:

Лиханова Ирина Александровна – канд. биол. наук., н.с. отдела почвоведения, Институт биологии Коми НЦ УрО РАН (167982, Россия, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28).
E-mail: likhanova@ib.komisc.ru

Ковалева Вера Александровна – м.н.с. отдела почвоведения, Институт биологии Коми НЦ УрО РАН (167982, Россия, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28).
E-mail: kovaleva@ib.komisc.ru

For citation: Likhanova IA, Kovaleva VA. Controlled restoration of forest ecosystems on sandy technogenic substrates in the far northern taiga of the Russian European Northeast. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* = *Tomsk State University Journal of Biology*. 2018;43:174-195. doi: [10.17223/19988591/43/9](https://doi.org/10.17223/19988591/43/9). In Russian, English Summary

Irina A. Likhanova, Vera A. Kovaleva

Institute of Biology, Komi Scientific Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktывkar, Russian Federation

Controlled restoration of forest ecosystems on sandy technogenic substrates in the far northern taiga of the Russian European Northeast

Effective methods for restoring damaged areas are required now due to the recent intensification of natural resource extraction in the north of the taiga zone of the European northeast of Russia. However, approaches of forest recultivation for this region are still under development. The aim of our research was to justify planting of trees simultaneously with creation of an artificial herb cover from perennial grasses.

We started an experiment including trials with planting of *Pinus sylvestris* L. (seedlings and large wide trees), without tree planting and with simultaneous planting of perennial herbs and application of organic and mineral fertilizers. Care of artificial communities included addition of plantings. In trials with herbs, it included addition of mineral fertilizers (See Table 1). The experimental plot was laid at a dry sandy quarry in the far northern taiga (66°16'43"N, 57°16'41"E). We studied the dynamics of biometric parameters and phytopathological state annually during eight years in tree plantings. We also estimated the projective cover and mean tree height. The aboveground phytomass was assessed by hay cutting, and the underground phytomass was by a monolith approach. It soil samples, we determined potentiometric water pH, organic carbon and

nitrogen by gas chromatography; labile potassium and phosphorus by Kirsanov's approach and exchangeable Ca^{2+} and Mg^{2+} by the displacement by NH_4Cl followed by atomic absorption analysis. Population of soil microorganisms was studied by diluting soil suspension followed by inoculation in standard media. In order to estimate the significance of differences in the trials, we used single-factor analysis of variance and a two-sample t-test with different variances.

Creation of pine cultures by local large wide trees with ground lump accelerated the formation of a tree layer in comparison with the use of seedlings (See Tables 2-6). In the trials without agricultural approaches, there was no vegetation cover and changes in the sandy substrate (See Tables 7 and 8). In the trials including tree and perennial herb planting with mineralization, a constant increase in the projective cover and phytomass was detected for the artificial herb layer, but this herb layer degraded quickly when these additions were stopped (See Fig. 1 and 2a). Due to this addition, by the 8th year of controlled succession, over 780 g/m² of plant matter had been accumulated at the plot, the sandy substrate had been consolidated and its water-chemical and agrochemical properties had improved (See Table 7), biogeneity had increased (See Table 8), vascular plants had been implanted more actively and the moss layer formed by pioneer species had covered up to 70 % of the surface. In the trial with the average developed herb layer (phytomass about 170 g/m²), by the 8th year of the experiment, the medium height and livability of pine cultures had been higher ($p=0.05$) than in other trials with seedlings. The livability and growth rate of seedlings in the trials with a well-developed herb layer (phytomass about 300 g/m²) did not differ from the trial with seedlings without fertilizers. Therefore, in order to consolidate the sandy technogenic substrate and to accumulate organic matter, on the one hand, and to reach a suitable pine growth rate, on the other hand, it is good to create a herb layer with phytomass about 150-200 g/m².

The paper contains 2 Figures, 8 Tables and 44 References.

Key words: *Pinus sylvestris*; forest recultivation; controlled succession; artificial herb layer; sandy technogenic substrate, ecosystem; soil microbial coenosis.

Funding: The work was carried out within the state task "Revealing general patterns in the formation and functioning of peat soils in the Arctic and Subarctic sectors of the Russian European Northeast" (No AAAA-A17-117122290011-5).

References

1. Akul'shina NP, Lobovikov NI, Mengalimov KhYa. Opyt fitomelioratsii erodirovannykh pochvo-gruntov na trasse magistrol'nogo nefteprovoda Vozey-Usa-Ukhta [Experience in phytomelioration of eroded soils on the main pipeline route Vozey-Usa-Ukhta]. *Rastitelnye resursy*. 1981;17(2):175-183. In Russian
2. *Biologicheskaya rekultivatsiya na Severe (Voprosy teorii i praktiki)* [Biological recultivation in the North (Theory and practice)]. Archegova IB, editor. Syktyvkar: Komi scientific center of the RAS Publ.; 1992. 104 p. In Russian
3. Turubanova LP, Likhanova IA. Vegetation dynamics on the posttechnogenic territories of Usinsk raion, Komi Republic, after various species of permanent grasses were sown. *Contemporary Problems of Ecology*. 2013;2:223-233. doi: [10.1134/S1995425513020157](https://doi.org/10.1134/S1995425513020157)
4. Kapel'kina LP. Estestvennoe i iskusstvennoe lesovozobnovlenie na narushennykh zemlyakh Severa [Natural and artificial reforestation on disturbed lands of the North]. *Lesnoy zhurnal = Forestry Journal*. 1983;1:21-24. In Russian
5. Parfenyuk VI. Lesnaya rekultivatsiya narushennykh zemel' v zone kraynesevernoy taygi Komi ASSR [Forest recultivation of damaged areas in the zone of the far-northern taiga of the Komi USSR]. In: *Osvoenie Severa i problemy rekultivatsii*. Materialy nauch. konf. [Development of the North and problems of recultivation. Proc. of the Sci. Conf. (Syktyvkar,

- Russia, 8-14 July, 1991)]. Syktyvkar: IB Komi SC UB RAS Publ.; 1991. pp. 155-156. In Russian
6. Sokolov AI, Fedorez NG, Krivenko TI, Leibonen EE, Novizkaja LL. Early stages in the formation of biogeocenoses at curly birch cultivation on the spoil banks of Kostomukshskoye iron ore deposit. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii = News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy*. 2010;191:22-31. In Russian
 7. Fedorets NG, Sokolov AI, Kryshen' AM, Medvedeva MV, Kostina EE. Formirovanie lesnykh soobshchestv na tekhnogennykh zemlyakh severa-zapada taezhnoy zony Rossii [Forming forest ecosystems on technogenic substrates in the North-West of the Russian boreal zone]. Petrozavodsk: Karelian Research Center of the RAS Publ.; 2011. 130 p. In Russian
 8. *Rekul'tivatsiya zemel' na Severe. Rekomendatsii po rekul'tivatsii zemel' na Kraynem Severe* [Land recultivation in the North. Recommendations for recultivation in the Far North]. Archegova IB, editor. Syktyvkar: IB Komi SC UB RAS Publ.; 1997. 34 p. In Russian
 9. *Trebvaniya k tekhnologiyam rekul'tivatsii zagryaznennykh neft'yu zemel'* [Requirements to the recultivation of oil-polluted areas]. Syktyvkar: NIPI "Komimeliiovodkhozproekt" Publ.; 2014. 134 p. In Russian
 10. Powder CB, Chymko NR, Dinwoodie G, Howat D, Janz A, Puhlmann R, Richens T, Watson D, Sinton H, Ball JK, Etmanski A, Patterson DB, Brocke LK, Dyer R. Regulatory history of Alberta's industrial land conservation and reclamation program. *Canadian Journal of Soil Science*. 2012;92:39-51. doi: [10.4141/cjss2010-033](https://doi.org/10.4141/cjss2010-033)
 11. Lima AT, Mitchell K, O'Connell DW, Verhoeven J, Cappellen PV. The legacy of surface mining: Remediation, restoration, reclamation and rehabilitation. *Environmental Science & Policy*. 2016;66:227-233. doi: [10.1016/j.envsci.2016.07.011](https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.07.011)
 12. Likhanova IA, Archegova IB. Development of theoretical and practical aspects of disturbed lands restoration in the North of the Komi Republic. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya = Theoretical and Applied Ecology*. 2014;3:79-85. In Russian
 13. Evans DM, Zipper CE, Burger JA, Strahm BD, Villamagna AM. Reforestation practice for enhancement of ecosystem services on a compacted surface mine: Path toward ecosystem recovery. *Ecological Engineering*. 2013;51:16-23. doi: [10.1016/j.ecoleng.2012.12.065](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.065)
 14. Zipper CE, Burger JA, Skousen JG, Angel PN, Barton CD, Davis V, Franklin JA. Restoring forests and associated ecosystem services on Appalachian coal surface mines. *Environmental Management*. 2011;47:751-765. doi: [10.1007/s00267-011-9670-z](https://doi.org/10.1007/s00267-011-9670-z)
 15. Kazakov LA, Vishnyakov GV, Chamin VA. Lesomelioratsiya Kuzomenskikh peskov [Forest melioration of Kuzminski sands]. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo centra Rossiyskoy Akademii nauk = Herald of the Kola Science Centre RAS*. 2011;2:58-63. In Russian
 16. Likhanova IA, Archegova IB, Habibullina FM. Vosstanovlenie lesnykh ekosistem na tekhnogenno narushennykh territoriyakh Severa [Restoration of forest ecosystems in technogenically disturbed areas of the North]. Yekaterinburg: UrO RAN Publ.; 2006. 104 p. In Russian
 17. Torbert JL, Schoenholtz SH, Burger JA, Kreh RE. Growth of three pine species on pre- and post-SMCRA land in Virginia. *Northern Journal of Applied Forestry*. 2000;17:95-99.
 18. Skousen J, Ziemkiewicz P, Venable C. Tree recruitment and growth on 20-year-old, unreclaimed surface mined lands in West Virginia. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2006;20:142-154. doi: [10.1080/17480930600589833](https://doi.org/10.1080/17480930600589833)
 19. Franklin JA, Zipper CE, Burger JA, Skousen JG, Jacobs DF. Influence of herbaceous ground cover on forest establishment and growth on eastern US coal surface mines. *New Forests*. 2012;43:905-924. doi: [10.1007/s11056-012-9342-8](https://doi.org/10.1007/s11056-012-9342-8)
 20. Varaksin GS, Kuznecova GV. Specifics of biological recultivation in Norilsk industrial region]. *Sibirskij lesnoj zhurnal = Siberian Journal of Forest Science*. 2016;2:92-101. doi: [10.15372/SJFS20160209](https://doi.org/10.15372/SJFS20160209) In Russian, English Summary

21. Semenov BA, Tsvetkov VF, Chibisov GA, Elizarov FP. Pritundrovye lesa evropeyskoy chasti Rossii (priroda i vedenie khozyaystva) [Subtundra Forests of the European Part of Russia (Nature and Forest Management)]. Arkhangel'sk: Northern Research Institute of Forestry Publ.; 1998. 332 p. In Russian
22. Kapitonova OA, Selivanov AE, Kapitonov VI. Structure of plant communities of the initial stages of succession on anthropogenic sandy outcrops of the forest-tundra and northern taiga of West Siberia. *Contemporary Problems of Ecology*. 2017;24(6):731-745. doi: [10.15372/sej20170606](https://doi.org/10.15372/sej20170606)
23. Hvatov YuA. Oblesenie zemel', narushennykh pri razrabotke mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh [Afforestation of lands disturbed during development of mineral deposits]. Moscow: CBSTI of Forestry Publ.; 1973. 56 p. In Russian
24. Dospekhov BA. Metodika polevogo opyta [Method of field experiment]. Moscow: Agropromizdat Publ.; 1985. 351 p. In Russian
25. Ogievskiy VV, Khiron VV. Obsledovanie i issledovanie lesnykh kul'tur [Investigation of forest cultures]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' Publ.; 1964. 50 p. In Russian
26. Sokolova ES, Vedernikov NM. Ukazaniya po diagnostike bolezney khvoynykh porod v pitomnikakh i molodnyakakh [Guidelines for the diagnosis of coniferous diseases in nurseries and young communities]. Moscow: Minleskhoz RSFSR Publ.; 1988. 77 p. In Russian
27. *Metody izucheniya lesnykh soobshchestv* [Methods of studying forest communities]. Yarmishko VT and Lyanguzov IV, editors. St. Petersburg: Research Institute of Chemistry of St. Petersburg State University Publ.; 2002. 240 p. In Russian
28. *Teoriya i praktika khimicheskogo analiza pochv* [Theory and practice of soil chemical analysis]. Vorob'eva LA, editor. Moscow: GEOS Publ.; 2006. 400 p. In Russian
29. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* [Classification and diagnostics of soils of Russia]. Dobrovol'skiy GV, editor. Smolensk: Oykumena Publ.; 2004. 342 p. In Russian
30. *Metody pochvennoy mikrobiologii i biokhimii* [Methods of soil microbiology and biochemistry]. Zvyagintsev DG, editor. Moscow: Moscow State University Publ.; 1991. 304 p. In Russian
31. Larin VB, Pautov YuA. Formirovanie khvoynykh molodnyakov na vyrubkakh severovostoka evropeyskoy chasti SSSR [Formation of young spruce forests on deforested lands in the northeastern part of the European USSR]. Leningrad: Nauka Publ.; 1989. 144 p.
32. Podlesnaya NI, Pereverzev VN. Fitomelioratsiya territoriy, narushennykh promyshlennost'yu. Melioratsiya zemel' Kraynego Severa [Phytomelioration of industrially damaged territories. Land reclamation of the Far North]. Moscow: "Kolos" Publ.; 1977. pp. 227-234. In Russian
33. Rahmonov O, Snytko VA, Szczypek T, Parusel T. Vegetation development on post-industrial territories of the silesian upland (Southern Poland). *Geography and Natural Resources*. 2013;34(1):166-173. doi: [10.1134/2FS1875372813010137](https://doi.org/10.1134/2FS1875372813010137)
34. Patova EN, Kulyugina EE, Deneva SV. Processes of natural soil and vegetation recovery on a worked-out open pit coal mine (Bol'shezemel'skaya tundra). *Russian Journal of Ecology*. 2016;3:173-179. doi: [10.7868/S0367059716020116](https://doi.org/10.7868/S0367059716020116)
35. Zheleznova GV, Shubina TP. Vidovoy sostav mkhov tekhnogenno narushennykh landshaftov Respubliki Komi [The species composition of mosses in the technogenically disturbed areas of the Komi Republic]. *Botanicheskiy zhurnal = Botanical Journal*. 2005;90(2):215-222. In Russian
36. Mackenzie DD, Naeth MA. The role of the forest soil propagule bank in assisted natural recovery after oil sands mining. *Restoration Ecology*. 2010;18:418-427. doi: [10.1111/j.1526-100X.2008.00500.x](https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2008.00500.x)
37. Lambers H, Mougél C, Jaillard B, Hinsinger P. Plant-microbe-soil interactions in the rhizosphere: an evolutionary perspective. *Plant and Soil*. 2009;321(1-2):83-115. doi: [10.1007/s11104-009-0042-x](https://doi.org/10.1007/s11104-009-0042-x)

38. Dimitriu PA, Prescott CE, Quideau SA, Grayston SJ. Impact of reclamation of surface-mined boreal forest soils on microbial community composition and function. *Soil Biology and Biochemistry*. 2010;42(12):2289-2297. doi: [10.1016/j.soilbio.2010.09.001](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.09.001)
39. Parmelee RW, Ehrenfeld JG, Tate RL III. Effects of pine roots on microorganisms, fauna, and nitrogen availability in two soil horizons of a coniferous forest spodosol. *Biology and Fertility of Soils*. 1993;15(2):115-119. doi: [10.1007/BF00336428](https://doi.org/10.1007/BF00336428)
40. Sumina OI, Vlasov DYU, Dolgova LL, Safronova EV. Osobennosti formirovaniya soobshchestv mikromitsetov v zarastayushchikh peschanykh karerov severa Zapadnoy Sibiri [Features of formation of micromycete communities in overgrown sand quarries of the north of Western Siberia]. *Vestnik of Saint Petersburg University. Series 3. Biology*. 2010;2;84-90. In Russian
41. Evdokimova GA, Kalmykova VV. Biological activity of remediated industrial dumps northern taiga conditions. *Agrokhimiya*. 2008;1:63-67. In Russian
42. Gordeeva TH, Malyuta OV. Dinamika parametrov biologicheskoy aktivnosti pochvy kak pokazatel pochvenno-ekologicheskikh usloviy na obekte rekultivatsii [Dynamics of soil biological activity parameters as an index of soil-ecological conditions at the site of reclamation]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2013;2(40):34-36. In Russian
43. Markova IA. Osnovnye faktory uspehnogo rosta lesnykh kul'tur na Severo-Zapade Rossii [Main factors of successful growth of forest cultures in the Russian Northwest]. In: *Lesovosstanovlenie na Evropeyskom Severe*. Materialy nauch. seminarov [Restoration of forest in the European North. Proceedings]. Helsinki: Forest Research Institute of Finland Publ.; 2000. pp. 183-193. In Russian
44. Luoranen J, Rikala R. Field performance of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings planted in disc trenched or mounded sites over an extended planting season. *New Forests*. 2013;44:147-162. doi: [10.1007/s11056-012-9307-y](https://doi.org/10.1007/s11056-012-9307-y)

Received 15 November 2017; Revised 07 March 2018;

Accepted 08 May 2018; Published 12 October 2018

Author info:

Likhanova Irina A, Cand. Sci (Biol.), Researcher, Department of Soil Science, Institute of Biology, Komi Science Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 28 Kommunisticheskaya Str., Syktyvkar 167982, Komi Republic, Russian Federation.

E-mail: likhanova@ib.komisc.ru

Kovaleva Vera A, Researcher, Department of Soil Science, Institute of Biology, Komi Science Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 28 Kommunisticheskaya Str., Syktyvkar 167982, Komi Republic, Russian Federation.

E-mail: kovaleva@ib.komisc.ru