

СУБСТРАТЫ НА ОСНОВЕ ТОРФА И КОМПСТИРОВАННОГО АКТИВНОГО ИЛА АРХАНГЕЛЬСКОГО ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО КОМБИНАТА ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ ПОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА ХВОЙНЫХ ПОРОД

Е.Н. Наквасина[✉], С.В. Коптев, М.В. Никитина

ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), 163002, Россия, г. Архангельск, ул. Набережная Северной Двины, д. 17

e.nakvasina@narfu.ru

Рассмотрены возможности использования компстированного отработанного активного ила для изготовления торфяного субстрата, предназначенного для использования при выращивании семян основных лесобразующих пород в тепличном комплексе. Охарактеризовано влияние отходов активного ила трехлетней выдержки (биогумус «Архангельский») на водно-физические свойства субстратов (плотность, истинную плотность, пористость, водопоглощение и полную влагоемкость), и их агрохимические показатели (содержание нитратного и аммиачного азота, фосфора и калия, зольность, реакция почвенного раствора), а также влияние разного количества добавленного компстированного активного ила (добавка ила от 10 до 70 % по объему) в верховой торф (степень разложения 15 %) на свойства указанных субстратов. Выявлено, что все свойства субстратов на основе торфа и компстированного активного ила по значимости подразделяются на группы по влагосодержанию, агрофизическим и агрохимическим показателям, из которых наиболее приоритетными можно считать водные свойства, определяющие периодичность полива. Установлено, что при увеличении доли ила в композиции торфяного субстрата закономерно повышаются плотность сложения и истинная плотность субстрата, содержание подвижного фосфора и зольность, но в то же время ил снижает пористость субстрата и водонакопление, уменьшает содержание нитратного азота. Определена наиболее оптимальная добавка к торфу — 20 % компстированных отходов активного ила — при условии дополнительного внесения удобрений и проведения токсикологических экспертиз.

Ключевые слова: субстраты, торф, активный ил, водно-физические свойства, агрохимические свойства, требования, семена

Ссылка для цитирования: Наквасина Е.Н., Коптев С.В., Никитина М.В. Субстраты на основе торфа и компстированного активного ила Архангельского целлюлозно-бумажного комбината для выращивания посадочного материала хвойных пород // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 3. С. 67–77.

DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-67-77

Стратегия [1] ставит развернутые задачи по лесовосстановлению, поскольку потребность в посадочном материале основных лесобразующих пород имеет тенденцию к возрастанию, особенно в отношении семян и саженцев с закрытой корневой системой. Учитывая перспективы, Архангельский целлюлозно-бумажный комбинат (АЦБК) и группа компаний «Титан» инициировали создание нового селекционного центра с тепличным комплексом в районе г. Новодвинск Архангельской области, рассмотрев возможность подготовки собственных субстратов для выращивания посадочного материала с использованием отработанного активного ила, ранее складированного, а в настоящее время подлежащего утилизации в качестве биотоплива. Такой подход считается перспективным [2, 3]. При правильном использовании указанные субстраты могут служить альтернативой обычным торфяным субстратам [2, 4] и позволят экономить

средства, заменяя коммерческие субстраты и применяя минеральные удобрения [3].

Согласно исследованиям, обезвоженный активный ил очистных сооружений может содержать тяжелые металлы, что ограничивает его использование в качестве мелиоранта или удобрения [5–7]. Тяжелые металлы (ТМ) являются непременной составляющей минеральных фаз илов: глинистых минералов, оксидов и гидроксидов железа и алюминия, карбонатов кальция и магния [8].

Отходы активного ила АЦБК относятся к веществам 5-го класса опасности вследствие наличия в них существенного количества тяжелых металлов, в частности: меди — 840 мг/кг, цинка — 530, железа — 4600, марганца — 1800, никеля — 42 мг/кг. Эти данные превышают нормативы содержания для осадков 1 группы (по меди) в 1,12 раза согласно ГОСТ Р 17.4.3.07–2001. Гельминты при этом не обнаружены.

Учитывая возможную токсичность отходов активного ила, для использования в сельском

и лесном хозяйстве их необходимо перерабатывать, подготавливая к технологическим процессам дальнейшего применения. К наиболее распространенным относятся следующие методы переработки [9–12]: биологические, химические, механические и термические. В некоторых случаях может быть применен комплекс методов.

Переработанный ил можно применять в сельском хозяйстве, смешивая его с почвой, торфом и др. [13]. Предприятие, которое ориентируется на использование отходов активного ила в качестве удобрений, должно ориентироваться на требования стандарта [14], в котором приведены общие требования к осадкам, применяемым в качестве органических или органоминеральных удобрений для рекультивации земель и при размещении на полигонах.

Рекомендации по использованию отходов ила с различных площадок в прошлом веке разрабатывались неоднократно, велись и научные исследования, чаще по осадкам городских сточных вод. Во всех случаях речь шла о повышении плодородия почв и компостировании, в некоторых случаях были подобраны ориентировочные дозы подобных отходов для применения в сельском хозяйстве на минеральных почвах [15, 16].

При использовании малообъемных технологий культивирования требования, предъявляемые к среде выращивания, отличаются значительно большей жесткостью, чем к открытому грунту, где есть возможности для роста корней в неограниченном объеме почвы [17]. Это связано с необходимостью развития корневых систем сеянцев в малом объеме грунта. Кроме того, следует учитывать весь комплекс агро- и физико-химических свойств, в частности наличие компонентов минерального питания (NPK и микроэлементы), влагоемкость и плотность субстрата, что обеспечит необходимый водно-воздушный режим и устойчивость комка, в том числе при посадке на лесокультурную площадь.

Цель работы

Цель работы — изучение влияния компостируемых отходов активного ила АЦБК на комплекс водно-физических и агрохимических показателей субстратов на основе верхового торфа для отбора наиболее оптимального соотношения торф : ил при изготовлении субстратов для выращивания посадочного материала основных лесобразующих пород в теплице.

Объекты и методы исследования

Для проведения эксперимента с композициями субстратов был использован верховой торф, заготовленный на чеках предприятия «Архангельская клюква», с глубины торфяной залежи 40...80 см,

со степенью разложения 15 %, что подтверждено проверкой по определению насыпной плотности, согласно работе [18]. В качестве биоактивного компонента использованы компостируемые отходы отработанного активного ила АЦБК в виде биогумуса «Архангельский» (далее — ил) трехлетней выдержки, подготовленного согласно утвержденному в 2014 г. регламенту, и предоставленного фермерским хозяйством «Биолаборатория».

Композиции субстратов из торфа и ила составляли в процентном объемном выражении (в расчете на 1 л субстрата), что считается общепринятым [19]. Дополнительные удобрения и наполнители не использовали. Испытывали комбинации субстратов с долей ила от 10 до 70 %, а также чистый торф и ил (100 %).

Для сравнения подобраны пять вариантов промышленных образцов различного производства из России и Финляндии, применяемых в лесных теплицах Устьянского, Шенкурского, Вельского лесничеств, производства предприятий ООО Pindstrup (два образца), ООО «Велторф» (два образца), «Kekkila». Все субстраты изготовлены на основе белого сфагнового торфа, имеющего сертифицированную степень разложения 15 %, что считается средним для подобных торфов [20]. Подобные субстраты, по мнению В.В. Носникова и др. [21], наиболее подходят для кассетного выращивания.

Для изучения свойств торфа и субстратов, как эталонных, используемых в теплицах Архангельской области, так и композиций на основе торфа и отходов активного ила, применяли основные методы и определяли показатели, характерные для оценки торфов и торфяных субстратов [18, 22]. Расчеты проводили по общепринятым в почвоведении методикам [23].

При этом определяли не только питательную составляющую субстратов (зольность, кислотность, содержание азота, фосфора и калия), но и водно-физические свойства, характеризующие смешение удобрений, равномерность полива, а также их влагонасыщение, уплотненность, воздухонасыщение и др., что позволяет дать оценку и по водно-воздушному режиму, и по режиму питания, и по возможности их регулирования [24].

Использовали размолотый на дробилке ТермМикс торф и сухой компостируемый ил, просеянные через сито 2 мм. При определении водно-физических показателей (2–7 повторностей каждого показателя) использовали торф/субстрат с частицами менее 2 мм; при проведении агрохимических анализов — фракцию менее 1 мм.

Из водно-физических свойств на базе лаборатории почвоведения САФУ определяли плотность сухого торфа/субстрата, плотность сухого веще-

Т а б л и ц а 1

Сравнительная характеристика исходных компонентов и испытываемых субстратов

Comparative characteristics of initial components and tested substrates

Субстрат	Плотность сложения, г/см ³	Истинная плотность, г/см ³	Влагоемкость, %			Пористость, %	Зольность, %	pH сол	Содержание, мг/100 г			
			2 ч	48 ч	Полная полевая				NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	P ₂ O ₅	K ₂ O
Исходные компоненты												
Торф	0,046 ± 0,003	0,768	1349,1	1795,0	1778,6	94,0	2,3 ± 0,1	3,2 ± 0,1	< 25	54,0 ± 10,0	24 ± 10	56 ± 10
Ил	0,381 ± 0,001	1,440	190,02	228,9	227,0	73,5	29,0 ± 0,5	6,4 ± 0,01	< 25	< 14	1161 ± 38	51 ± 9
Субстраты из смеси компонентов (n = 7; F _{теор} = 5,99)												
10 % ила	0,076 ± 0,001	0,875	715,2	939,7	931,5	91,3	15,5 ± 0,4	5,4 ± 0,1	< 25	26,0 ± 5,0	564 ± 24	< 50
20 % ила	0,137 ± 0,003	0,938	627,8	721,5	714,5	85,4	20,3 ± 0,4	6,1 ± 0,1	< 25	19,0 ± 3,4	853 ± 36	< 50
30 % ила	0,188 ± 0,004	1,157	413,5	484,8	480,5	83,8	26,0 ± 0,5	6,2 ± 0,1	< 25	17,0 ± 3,0	950 ± 40	< 50
40 % ила	0,213 ± 0,002	1,245	351,9	389,2	386,4	81,5	28,5 ± 0,5	6,4 ± 0,1	< 25	14,7 ± 2,6	1050 ± 40	< 50
50 % ила	0,230 ± 0,006	1,371	348,0	374,8	372,0	83,2	29,3 ± 0,5	6,4 ± 0,1	< 25	15,5 ± 2,8	1090 ± 50	< 50
60 % ила	0,282 ± 0,003	1,487	311,0	326,1	323,1	81,0	30,6 ± 0,06	6,6 ± 0,1	< 25	< 14	1139 ± 38	< 50
70 % ила	0,297 ± 0,007	1,550	285,7	296,9	294,4	80,8	29,9 ± 0,05	6,6 ± 0,1	< 25	14,1 ± 2,5	1109 ± 37	< 50
F _{факт}	23,93	23,09	31,21	22,60	22,56	21,84	5,17	17,69	–	23,97	23,24	–

Примечание. F_{факт} — фактический показатель достоверности признака.

ства торфа/субстрата (истинную плотность), пористость, водопоглощение (на 2 ч и 48 ч) и полную влагоемкость общепринятыми методами [22, 23]. Для определения водных свойств использовали металлические цилиндры с сетчатым дном. Плотность сложения торфа/субстрата определяли насыпным методом с использованием металлического цилиндра известного объема. Истинную плотность определяли пикнометрически при соотношении субстрата и воды не более 5 г почвы на 100 см³ воды.

Агрохимические анализы проводили в испытательной лаборатории ФГБУ САС «Архангельская», по стандартным методикам: зольность — по ГОСТ 11306–2013, п. 7; массовая доля нитратного азота (сухое вещество), % — по ГОСТ 27894.4–88, п. 3; массовая доля аммиачного азота (сухое вещество), % — по ГОСТ 27894.4–88, п. 3; обменная кислотность (ед. pH) — по ГОСТ 11623–89, п. 2; массовая доля калия в пересчете на оксид калия K₂O (% на сухое вещество) — по ГОСТ 27894.4–88; массовая доля фосфора в пересчете на P₂O₅ (% на сухое вещество) — по ГОСТ 27894.4–88. Процентное содержание азота, фосфора и калия пересчитали на содержание (в мг/100 г) торфа/субстрата.

Изменчивость изученных признаков/свойств субстратов составляет 3...29 %. Близкие значения

средних и срединных переменных указывают на нормальность их распределения. Величина эксцесса для большинства признаков отрицательна, что свидетельствует о растянутости рядов распределения. Асимметрия положительна и находится в пределах 0,04...0,55.

Для выявления связей между факторами и показателями провели корреляционный, дисперсионный, кластерный и факторный анализы. Стратегия объединения объектов кластеризации реализована [24, 25] на основе евклидовых расстояний (по методу ближайшего соседа).

Результаты и обсуждение

Проведена комплексная оценка композиций субстратов, торфа и ила (100 %), а также производственных субстратов, как эталонов (табл. 1, 2).

Корреляционный анализ показал высокий достоверный уровень связей между всеми исследуемыми параметрами и долей ила в композиции субстратов (при $p < 0,05$). Коэффициенты корреляции составили от 0,85 до 0,98 и подтвердили линейную разнонаправленную зависимость изменения показателя при добавлении ила в комбинации к верховому торфу. При увеличении доли ила в композиции субстрата закономерно повышаются плотность сложения и истинная плотность, содержание подвижного фосфора и зольность.

**Средние значения показателей для производственных субстратов,
применяемых в лесных теплицах Архангельской области**

Average values of indicators for production substrates used
in forest greenhouses in the Arkhangelsk region

Показатель	Плотность сложения, г/см ³	Истинная плотность, г/см ³	Влагоемкость, %			Пористость, %	Зольность, %	pH сол	Содержание, мг/100 г			
			2 ч	48 ч	Полная полевая				NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	P ₂ O ₅	K ₂ O
Среднее значение	0,142 ± 0,012	1,389 ± 0,043	479,3 ± 29,8	626,0 ± 49,7	602,00 ± 48,60	90,4 ± 1,2	5,1 ± 0,5	4,3 ± 0,2	47 ± 16	160 ± 20	260 ± 32	410 ± 34
Q	0,024	0,087	59,6	99,3	97,2	2,45	0,95	0,38	31	36	63	31
Лимиты ±2Q	0,094–0,222	1,215–1,563	360,1–598,4	427,3–824,7	407,6–796,4	85,5–95,3	3,2–7,0	3,5–5,0	0–109	88–232	124–386	384–472

Примечание. Q — стандартное отклонение в единицах измерения признака.

В то же время ил снижает пористость субстрата, «подсушивает» его, т. е. снижает водонакопление, и уменьшает содержание нитратного азота.

Влияние градиентного внесения ила в торф доказывается по всем изученным показателям ($F_{\text{факт}} = 17...31$ при $F_{\text{теор}} = 5, 99$), кроме зольности субстрата ($F_{\text{факт}} = 5,17$). Зольность комбинированного субстрата из торфа и ила зависит от двух компонентов, которые значительно разнятся (2,3 и 29,0 % соответственно). В результате пока в субстрате по объему превалирует торф (10...40 % ила), наблюдается клинальное изменение зольности в сторону ее увеличения. При бóльших долях ила наблюдается стагнация и зольность субстрата достигает величины, соответствующей 100 % компостируемому илу без добавок торфа. В то же время, согласно рекомендациям по требованиям к торфяным субстратам [26], его зольность не должна быть выше 10 %.

В данном случае зольность значимо связана с истинной плотностью субстрата (коэффициент корреляции 0,935), содержанием аммиачного азота (коэффициент корреляции –0,965) и содержанием подвижного фосфора (коэффициент корреляции 0,982). Несомненно, эти связи определяются зольностью и содержанием питательных элементов активного ила, в котором содержание фосфатов в 48 раз больше, чем в торфе.

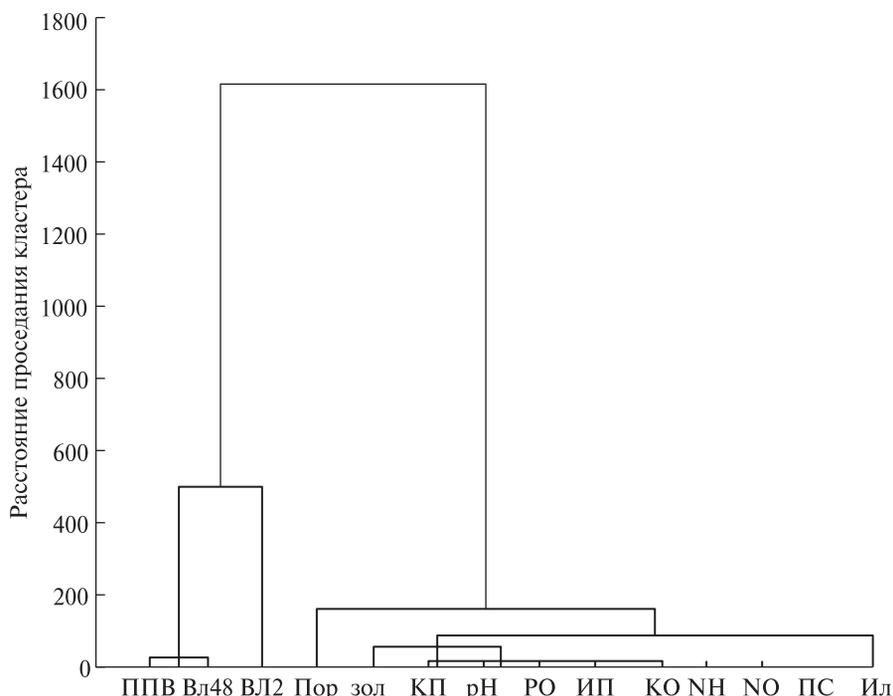
Факторный анализ показал наличие трех комплексных переменных — физических свойств, химических свойств и влагосодержания. Факторные нагрузки переменных физических и водных свойств изменяются в пределах 0,84...0,99, химических свойств — 0,06...0,50. Близкое распределение показателей видно и по кластеризации (рисунок), причем четко заметно выделение в отдельный кластер водосодержания в субстратах. На важность изучения способности субстратов сохранять влагу в кассетах указывали в работе [27], поскольку несоблюдение норм влагопоглощения

субстрата (менее 80 % массы воды в контейнере) может привести к необходимости регулировать поливы в тепличном комплексе.

Различия по свойствам исходных композиционных материалов значительны: они отличаются по физическим свойствам (насыпной плотности, истинной плотности) в 2 раза, по водным свойствам — в 6–8 раз, однако оба имеют высокую пористость: торф — 94, активный ил — 74 %. Это приводит к изменению физических свойств субстратов, формируемых из торфа и ила. Меньшие изменения происходят с пористостью, она стабилизируется при добавлении ила к торфу в количестве 30 %. В то же время добавление 10 % ила с низкой способностью к влагоудержанию отражается в снижении влагоемкости субстрата, и постепенно, по мере клинального увеличения доли ила, влагоемкость субстратов приближается к исходной влагоемкости ила. Переход свойств композиционного субстрата ближе к свойствам ила происходит при соотношении исходных компонентов 1:1. Это может быть опасно при использовании таких субстратов в теплицах, поскольку вызывает его быстрое пересыхание в кассетах.

Агрохимические показатели торфа, так же как и водно-физические, связаны со свойствами исходных компонентов. Исследования показали, что торф имеет очень низкую зольность (2,3 %), высокую кислотность (pH 3,2, что соответствует категории «сильнокислая»). Крайне низкое содержание аммиачного и нитратного азота (54 и менее 25 мг/100 г соответственно). Содержание фосфора для торфа [23] оценивается как высокое (56 мг/100 г), калия — как среднее (24 мг/100 г).

Компостируемый активный ил имеет низкую обменную кислотность (pH 6,4 нейтральная). По сумме соединений азота (NH₄ + NO₃) биогумус имеет низкое содержание — в 3 раза ниже, чем в торфе, т. е. не может служить поставщиком этого элемента в субстрат. Аналогично и с подвижными



Кластеризация показателей свойств субстратов по целевым группам: ППВ — полная полевая влагоемкость, %; Вл48 — максимальная влагоемкость (48 ч), %; Вл2 — влагоемкость через 2 ч, %; Пор — пористость, %; зол — зольность, %; КП — коэффициент пористости, %; рН — обменная кислотность, РО — содержание подвижного фосфора, мг/100 г; ИП — истинная плотность, г/см³; КО — содержание подвижного калия, мг/100 г; NH — содержание аммиачного азота, мг/100 г; NO — содержание нитратного азота, мг/100 г; ПС — плотность сложения, г/см³; Ил — доля добавки ила в торф, %

Indicators clustering of the substrates properties by target groups: ППВ — total field moisture capacity, %; Вл48 — maximum moisture capacity (48 hours), %; Вл2 — moisture capacity after 2 hours, %; Пор — porosity, %; зол — ash content, %; КП — porosity coefficient, %; рН — exchangeable acidity, РО — the content mobile phosphorus, mg/100 g; ИП — true density, g/cm³; КО — the content of mobile potassium, mg/100 g; NH — the content of ammonia, mg/100 g; NO — the content of nitrate ions, mg/100 g; ПС — the density of the substrate structure, g/cm³; Ил — the proportion of sludge addition to peat, %

формами калия, его содержание соответствует или несколько ниже, чем у торфа. В то же время в компостируемых отходах активного ила присутствует переизбыток подвижного фосфора, его содержание составляет 1160 мг/100 г. Внесение зафосфаченного активного ила в торф повышает его содержание в субстратах. Е.М. Романов [28] считает достаточным содержание фосфора для обеспечения роста сеянцев на дерново-подзолистой почве в количестве 10...15 мг/100 г почвы. В производственных торфяных субстратах оно не превышает 321 мг/100 г. Однако при приготовлении торфо-минерально-аммиачных удобрений (ТМАУ) допускались и более высокие дозы (более 2000 мг/100 г), хотя коэффициент использования фосфорных удобрений составляет только 2 %, калийных — 4, азотных — около 30 % [29]. При этом подчеркивалась необходимость соблюдения баланса между фосфором, калием и азотом.

Влияние компостируемых отходов активного ила начинается уже при добавлении 10 % к торфу — резко снижается обменная кислотность: рН возрастает от 3,2 до 5,4 (слабокислый), что считается вполне достаточным для выращивания сеянцев хвойных пород [30]. При добавлении 20 и 30 % биогумуса, величина рН достигает 6,1...6,4 (нейтральный), что близко к значению активного ила, тогда как, согласно работе [26], наиболее благоприятная кислотность субстрата при выращивании сеянцев ели составляет 4,0...5,0, сосны — 4,5...5,5, лиственницы — 5,5...6,0.

Различия по нитратному азоту (NO₃) по результатам анализа не заметны — по всем комбинациям его содержание ниже порогового значения прибора. В то время как по аммиачному азоту (NH₄) при внесении 10 % биогумуса содержание аммиачного азота резко снижается, а при внесении 20...40 % достигает соответствия со 100%-м компостируемым илом, что составляет при-

мерно 14 мг/100 г. Содержание нитратного азота в комбинационных субстратах соответствует современному и ранее применяемому промышленным субстратам [18] и может быть добавлено внесением удобрений.

Содержание аммиачного азота в комбинационных субстратах на порядок ниже, чем в производственных субстратах, что свидетельствует о необходимости его пополнения за счет внесения азотных удобрений в любых композициях. Увеличение в два раза доз внесения азотных удобрений в условиях тепличного хозяйства на северо-западе России [29] повышает качество получаемого посадочного материала.

Содержание подвижного калия практически не зависит от доли активного ила в композиционном субстрате на основе торфа, что связано с его примерно равным количеством в смешиваемых компонентах. Его содержание на порядок ниже, чем в производственных субстратах и может быть пополнено за счет использования минеральных удобрений для обеспечения соотношения питательных веществ в пропорции N : P : K.

Различия в содержании фосфора в торфе и активном иле резко изменяют его содержание в композиционных субстратах: при внесении в торф 10 % биогумуса содержание оксида фосфора (P_2O_5) увеличивается в 20 раз. Стагнация содержания наблюдается с дозы биогумуса 40 %: его содержание достигает 1050 мг/100 г и далее варьирует незначительно при увеличении соотношения ила по сравнению с торфом.

Градиентная добавка компостированного активного ила к торфу меняет некоторые его свойства, что необходимо учитывать при подборе наиболее оптимального сочетания комбинированных субстратов, которые бы соответствовали свойствам используемых производственных субстратов и имеющимся нормативам и рекомендациям. Считается, что приоритетными в комплексе показателей, определяющих свойства субстратов для малообъемных контейнеров в теплицах защищенного грунта, должны быть водно-физические свойства [27, 31, 32], так как агрохимические свойства можно скорректировать внесением макро- и микроудобрений и различных стимулирующих рост семян добавок [28]. При подборе композиций немаловажно учитывать и биоэкологические свойства выращиваемых пород, а также возможность их адаптации при посадке в почвенные условия лесокультурной площади [33].

В России не установлены четкие требования по субстратам для теплиц лесного комплекса, ориентированных на выращивание основных лесобразующих пород, и прежде всего сосны и ели. Ранее нормативы [34] и оптимальные условия для

выращивания семян хвойных пород [18, 28] были установлены, однако изменились технологии выращивания, устройства теплиц, объемы кассет, методы и подходы к оценке субстратов. В настоящее время нормативы и требования к субстратам корректируются как в России, так и за рубежом для различных смесей субстратов и выращиваемых пород [2, 19, 30–32, 35, 36 и др.], однако исследователи нередко обращают внимание лишь на одну сторону качества субстратов — либо водно-физические свойства, либо агрохимические. Объединению данных мешают различные подходы и методы.

Наиболее подходящими для комплексной оценки субстратов являются разработанные в Республике Беларусь технические условия к торфо-перлитным субстратам [26], которые предназначены для выращивания семян основных лесобразующих пород (сосны, ели, лиственницы, дуба) в современных теплицах закрытого грунта, однако и они не дают придержек по физическим свойствам субстратов.

Мы провели комплексную оценку комбинационных субстратов на основе торфа и разных долей внесения по объему активного ила, исходя из имеющихся нормативных и оптимальных данных по свойствам субстратов на предпосевной стадии, ориентируясь на выращивание наиболее распространенных для лесного хозяйства Севера пород — сосны и ели. За эталоны сравнения приняты пять вариантов промышленных субстратов. Подбор композиционных субстратов проводили по доверительному интервалу $\pm 2Q$ среднего значения признака эталонных субстратов (см. табл. 2) и с учетом имеющихся рекомендаций.

По комплексу показателей наиболее выгодной является композиция, которая наиболее подходит под требования субстратов — 20 % компостированных отходов активного ила. Такую же норму биологически активных веществ на основе отходов или сточных вод и торфа рекомендовали другие исследователи [37]. При использовании композиции 20 % компостированного активного ила не наблюдается изменение кислотно-основных свойств и буферности почвенного раствора, сохраняются запасы азота и калия, присущие торфу и активному илу, нет излишней зафосфаченности субстрата. Именно при этих композициях в необходимых пределах находятся пористость и плотность сложения субстрата.

Повышение доли ила до 30 % увеличивает подщелачивание, зафосфачивание и плотность сложения, заметно снижает скважность и влагоемкость субстрата. При этом у семян будет провоцироваться снижение необходимой грибной биоты для микоризообразования, что связано с усвоением питательных веществ, начиная со вто-

рого года жизни [38]. Повышение плотности субстрата будет не только снижать проникновение для сосущих корней сеянцев, но и увеличивать массу кассет, повышая энергетическую нагрузку в рабочем процессе. В опытах [37] более высокие дозы активного компонента в некоторых случаях снижали рост сеянцев или повышали риски, связанные с прорастанием семян.

Однако для обеспечения нормального роста сеянцев даже при добавлении в субстрат 20 % биогумуса на основе отходов активного ила, необходимо вносить минеральные удобрения — как макроудобрения, так и микроудобрения, прежде всего азотных, калийных удобрений и микроэлементов. Внесение известковых удобрений не требуется, отходы активного ила подщелачивают почву и уже при дозе 40 % кислотность заметно повышается выше требуемых для роста сосны и ели значений pH. При расчетах количества требующихся удобрений можно ориентироваться на рекомендации, разработанные для Устьянского лесопромышленного комплекса [30]. При использовании обезвоженных осадков в результате механической и биологической очистки сточных вод целлюлозно-бумажного производства и хозяйственно-бытовых сточных вод АЦБК экологотоксикологический контроль должен быть постоянным, так как даже при их переработке возможно выживание спорообразующих бактерий и сохранение патогенной микрофлоры [39, 40].

Выводы

При выращивании сеянцев хвойных пород в тепличном комплексе возможно применение компостированного отработанного активного ила АЦБК, подготовленного согласно утвержденному регламенту и при соблюдении оптимальных доз его внесения, соблюдения нормативов эколого-токсикологических экспертиз. Добавление к верховому торфу компостированного ила в количестве 20 % по объему обеспечит вполне оптимальные условия водно-воздушного режима и агрофизических характеристик, требующихся для малообъемных технологий выращивания сеянцев. Однако, несмотря на органогенный характер вещества и большое содержание фосфатов, применение активного ила требует дополнительного внесения калийных и азотных удобрений для обеспечения соотношения баланса питательных веществ (N : P : K), и микроудобрений. Провокационной при применении компостированного активного ила в отношении выращивания сеянцев хвойных пород, и прежде всего сосны и ели, является щелочная среда реакции почвенного раствора.

В дальнейшем необходимо провести исследования по выращиванию сеянцев основных лесо-

образующих пород с использованием композиционных субстратов, изучить их водно-воздушные и агрофизические свойства в условиях традиционной поливной нормы, проследить устойчивость комка при посадке на лесокультурную площадь.

Благодарности

Авторы благодарят Е.М. Романова и студентов САФУ А.А. Горелову, Е.С. Мусееву, П.А. Саулину, А.А. Игамбердиеву за помощь в подготовке композиций субстратов; А.М. Антонова и Г.А. Иванова за предоставленный компостируемый ил.

Исследования проводились при финансировании НОЦ «Русская Арктика: современные материалы, методы, технологии», Подпроект 4 «Исследования и подбор оптимального состава субстрата (грунта) для выращивания саженцев (сеянцев) хвойных пород применительно к условиям лесовосстановления на лесосырьевой базе предприятий ООО ПКП «Титан» и АО «Архангельский ЦБК».

Список литературы

- [1] Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 20 сентября 2018 г. № 1989-п. URL: <https://cA4eYSe0MOBgNpm5hSavTdlxID77KCTL.pdf> (government.ru) (дата обращения 20.09.2023).
- [2] Gabira M.M., Silva R.B.G., Bortolheiro F.P.A.P., Mateus C.M.D.A., Boas R.L.V., Rossi S., Girona M.M., Silva M.R. Composted sewage sludge as an alternative substrate for forest seedlings production // iForest — Biogeosciences and Forestry, 2021, v. 14, iss. 6, pp. 569–575. DOI: <https://doi.org/10.3832/for3929-014>
- [3] Alonso J.M., Pereira R.N., Abel E.L.D. Sewage sludge as substrate in *Schinus terebinthifolia* raddi seedlings commercial production // Sci. Rep., 2022, v. 12, p. 17245. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21314-0>
- [4] Usman Kh., Marwat S., Ghulam S., Khan M.U., Khan N.; Khan M.A., Khalil S. Sewage Sludge: An Important Biological Resource for Sustainable Agriculture and Its Environmental Implications // American J. of Plant Sciences, 2012, v. 03(12), pp. 1708–1721. DOI:10.4236/ajps.2012.312209
- [5] Горелова О.М., Титова К.Ю. Исследования об утилизации активного ила // Ползуновский вестник, 2015. № 4. Т. 1. С. 114–118.
- [6] Панов В.П., Зыкова И.В. Утилизация избыточных активных илов // Экология и промышленность России, 2001. № 12. С. 29–30.
- [7] Панов В.П., Зыкова И.В. Извлечение тяжелых металлов из избыточного активного ила при аэрировании // Журнал прикладной химии, 2005. Вып. 4. С. 608–612.
- [8] Панов В.П., Лысенко И.В., Зыкова И.В. К распределению тяжелых металлов по составляющим активного ила при биологической очистке сточных вод // Проблемы экономики и прогрессивные технологии в текстильной, легкой и полиграфической отраслях промышленности: сборник науч. трудов Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна, 2004. № 6. С. 150–153.

- [9] Горелова О.М., Титова К.Ю. Исследования по утилизации избыточного активного ила // Ползуновский вестник, 2015. № 4. Т. 1. С. 114–118.
- [10] Ляшенко Э.С., Васильева Ж.В. Перспективные методы утилизации биомассы активного ила // Охрана окружающей среды и здоровья человека в Российской Федерации и странах Евросоюза: сборник материалов междунауч.-практ. конф., Мурманск, 31 октября 2014 г. Мурманск: Изд-во Мурманского государственного технического университета, 2014. С. 57–61.
- [11] Haile A., Gelebo G.G., Tesfaye T. Pulp and paper mill wastes: utilizations and prospects for high value-added biomaterials // *Bioresour. Bioprocess*, 2021, v. 8, p. 35. <https://doi.org/10.1186/s40643-021-00385-3>
- [12] Бондарчук Е.В., Толмачев А.Б., Шептунов А.В. Переработка осадков сточных вод в почвогрунт // Яковлевские чтения: сб. докладов XVI Междунар. науч.-техн. конф., посвященной памяти академика РАН С.В. Яковлева, Москва, 15 марта 2021 года. М.: Изд-во Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, 2021. С. 31–33.
- [13] Ручай Н.С., Маркевич Р.М. Экологическая биотехнология. Минск: Изд-во БГТУ, 2006. 312 с.
- [14] Национальный стандарт РФ «Технические принципы обработки осадков сточных вод. Общие требования». М.: Российский институт стандартизации, 2021. 30 с.
- [15] Куликова А.Х., Захаров Н.Г., Вандышев И.А., Шайкин С.В., Карпов А.В. Проблема утилизации осадков сточных вод (ОСВ) в качестве удобрения сельскохозяйственных культур // Вестник Ульяновской сельскохозяйственной академии, 2007. № 1. С. 8–18.
- [16] Чеботарев Н.Т., Найденов Н.Д., Юдин А.А. Агроэкологическая оценка применения осадков сточных вод в качестве удобрений сельскохозяйственных культур // Наука. Мысль, 2016. № 1–2. С. 33–42.
- [17] Робонен Е.В., Зайцева М.И., Чернобровкина Н.П., Чернышенко О.В., Васильев С.Б. Опыт разработки и использования контейнерных субстратов для лесных питомников. Альтернативы торфу // *Resources and Technology*, 2015. v. 12 (1). С. 47–76. DOI: 10.15393/j2.art.2015.3081
- [18] Оценка пригодности субстрата для выращивания посадочного материала с закрытыми корнями / Сост. Белостоцкий Н.Н., Бирцева А.А., Жигунов А.В. Ленинград: Изд-во ЛенНИИЛХ, 1984. 29 с.
- [19] Якушева Т.В., Савицкая Н.В., Выродова С.А. Современные подходы к выращиванию посадочного материала хвойных пород с экс // Актуальные вопросы таежного и притундрового лесоводства на Европейском Севере России. М.: Издательские Технологии, 2023. С. 413–418.
- [20] Крамаренко В.В. Влияние ботанического состава на физические свойства торфа // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки, 2009. Вып. 2. С. 272–280.
- [21] Носников В.В., Соколовский И.В., Домасевич А.А., Юренин А.В., Граник А.М., Селищева О.А., Романчук А.В. Использование метода кондуктометрии для оценки качества субстратов на основе верхового торфа // Труды БГТУ, 2018. Сер. 1. № 2. С. 91–97.
- [22] Мисников О.С., Пухова О.В., Черткова Е.Ю. Физико-химические основы торфяного производства. Тверь: Изд-во Тверского государственного технического университета, 2015. 168 с.
- [23] Наквасина Е.Н., Любова С.В. Почвоведение. Архангельск: Изд-во САФУ, 2016. 146 с.
- [24] Гитис Л.Х. Статистическая классификация и кластерный анализ. М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2003. 157 с.
- [25] Дубовская Л.И., Князев Г.Б. Компьютерная обработка данных методами многомерной прикладной статистики. Томск: ТМЛ-Пресс, 2011. 120 с.
- [26] Субстраты торфяно-перлитные: технические условия ТУ ВУ 100061961.002–2015. URL: <https://mlh.by/lio/2015-5/3.pdf> (дата обращения 12.01.2023).
- [27] Dumroese R.K., Pinto J., Heiskanen J., Tervahauta A., McBurney K., Page-Dumroese D., Englund K. Biochar Can Be a Suitable Replacement for Sphagnum Peat in Nursery Production of *Pinus ponderosa* Seedlings // *Forests*, 2018, v. 9, p. 232.
- [28] Романов Е.М. Выращивание семян древесных растений: биоэкологические и агротехнические аспекты. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2000. 500 с.
- [29] Жигунов А.В. Теория и практика выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой для лесовосстановления: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук, 06.03.01, Москва, 1998. 40 с.
- [30] Жигунов А.В., Соколов А.И., Харитонов В.А. Выращивание посадочного материала с закрытой корневой системой в Устьянском комплексе. Петрозаводск: Изд-во Карельского научного центра РАН, 2016. 43 с.
- [31] Yeager T.H., Fare D.C., J. Lea-Cox J. Best management practices: Guide for producing container-grown plants // *Southern Nurserymen's Assoc.*, 2007, no. 3, pp. 200–203.
- [32] López-López N., Segarra G., Vergara Diaz O., López-Fabal A., Trillas M.I. Compost from forest cleaning green waste and *Trichoderma asperellum* strain T34 reduced incidence of *Fusarium circinatum* in *Pinus radiata* seedlings // *Biological Control*, 2015, v. 95. DOI 10.1016/j.biocontrol.2015.12.014
- [33] Abaurre G.W., Alonso J.M., Saggin Júnior O.J., de Faria S.M. Sewage Sludge Compared with Other Substrates in the Inoculation, Growth, and Tolerance to Water Stress of *Samanea saman* // *Water*, 2021, v. 13, p. 1306. <https://doi.org/10.3390/w13091306>
- [34] Справочник по лесным питомникам. М.: Лесная промышленность, 1983. 280 с.
- [35] Мухортов Д.И. Антропова А.В. Рост и развитие семян сосны обыкновенной в контейнерах при использовании субстратов различной плотности сложения // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: междунар. сб. науч. статей / под ред. Э.А. Курбанова. Йошкар-Ола: Изд-во Поволжского технологического университета, 2019. С. 42–53.
- [36] Wall A., Heiskanen J. Effect of air-filled porosity and organic matter concentration of soil on growth of *Picea abies* seedlings after transplanting // *Scandinavian J. of Forest Research*, 2003, v. 18, iss. 4, pp. 344–350. DOI: 10.1080/02827580310001742
- [37] Тебенькова Д.Н., Лукина Н.В., Воробьев Р.А., Орлова М.А. Всхожесть семян и биометрические параметры семян на субстратах из твердых отходов целлюлозно-бумажной промышленности // *Лесоведение*, 2014. № 6. С. 31–40.
- [38] Наквасина Е.Н. Ритмика роста семян сосны и ели. Биоэкологическое обоснование агротехники выращивания. Архангельск: Изд-во САФУ, 2016. 158 с.
- [39] Исаева А.М. Обработка и утилизация осадков сточных вод. Пенза: Изд-во ПГУАС, 2013. 128 с.
- [40] Дьяков М.С., Вайсман Я.И., Глушанкова И.С. Экологически безопасный способ утилизации твердых отходов биохимических очистных сооружений с получением продуктов, обладающих товарными свойствами // *Экология и промышленность России*, 2013. № 11. С. 53–61.

Сведения об авторах

Наквасина Елена Николаевна  — д-р с.-х. наук, профессор кафедры лесоводства и лесоустройства, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), nakvasina@yandex.ru

Коптев Сергей Викторович — д-р с.-х. наук, доцент, зав. кафедрой лесоводства и лесоустройства, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), s.koptev@narfu.ru

Никитина Мария Викторовна — канд. хим. наук, доцент кафедры теоретической и прикладной химии, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), m.nikinina@narfu.ru

Поступила в редакцию 14.16.2023.

Одобрено после рецензирования 23.01.2024.

Принята к публикации 22.03.2024.

ARKHANGELSK PULP AND PAPER MILL' PEAT-BASED SUBSTRATES AND COMPOSTED ACTIVATED SLUDGE FOR GROWING CONIFEROUS PLANTING STOCK

E.N. Nakvasina , **S.V. Koptev**, **M.V. Nikitina**

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 163002, Arkhangelsk, Russia

nakvasina@yandex.ru

The article discusses the possibilities of using composted activated sludge wasted by Archangelsk pulp mill in order to grow seedlings of the main forest-forming species in a greenhouse complex. The effect of 3 year-aged activated sludge (biohumus «Arkhangelsk») on water-physical properties (density, true density, porosity, water absorption and total moisture capacity), as well as agrochemical parameters (content of nitrate and ammonia nitrogen, phosphorus and potassium, ash content, reaction of soil solution) is shown. The effect on the substrate properties of added composted activated sludge (the addition of sludge from 10 to 70 % by volume) in bog peat (the decomposition degree of 15 %) has been established. It is shown that all the properties of peat-based substrates and composted sludge are divided into three groups according to their significance: moisture content, agrophysical and agrochemical, of which the most priority water properties can be considered, on which the frequency of irrigation depends. It was found that with an increase in the proportion of silt in the composition of the substrate, the addition density and the true density of the substrate, the content of labile phosphorus and ash content naturally increase, but at the same time, silt reduces the porosity of the substrate and water accumulation, reduces the content of nitrate-nitrogen. According to the set of indicators, in comparison with the previously established optimal indicators and standards for growing pine and spruce seedlings, as well as with reference industrial production substrates, the most optimal is the addition to peat of 20 % of the composted waste of activated sludge wasted by Archangelsk pulp mill, subject to additional fertilization and toxicological examinations.

Keywords: substrates, peat, activated sludge, water-physical properties, agrochemical properties, requirements, seedlings

Suggested citation: Nakvasina E.N., Koptev S.V., Nikitina M.V. *Substraty na osnove torfa i kompostirovannogo aktivnogo ila Arkhangel'skogo tsellyulozno-bumazhnogo kombinata dlya vyrashchivaniya posadochnogo materiala khvoynykh porod* [Arkhangelsk Pulp and Paper Mill' peat-based substrates and composted activated sludge for growing coniferous planting stock]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 3, pp. 67–77. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-67-77

References

- [1] *Strategiya razvitiya lesnogo kompleksa Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda* [Strategy for the development of the forest complex of the Russian Federation until 2030]. Uтверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 20 сентября 2018 г. № 1989-р. [Approved by the order of the Government of the Russian Federation of September 20, 2018, no. 1989-p.]. Available at: <https://cA4eYSe0MObgNpm5hSavTdIXID77KCTL.pdf> (government.ru) (accessed 20.09.2023).
- [2] Gabira M.M., Silva R.B.G., Bortolheiro F.P.A.P., Mateus C.M.D.A., Boas R.L.V., Rossi S., Girona M.M., Silva M.R. Composted sewage sludge as an alternative substrate for forest seedlings production. *iForest — Biogeosciences and Forestry*, 2021, v. 14, iss. 6, pp. 569–575. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifer3929-014>
- [3] Alonso J.M., Pereira R.N., Abel E.L.D. Sewage sludge as substrate in *Schinus terebinthifolia raddi* seedlings commercial production. *Sci. Rep.*, 2022, v. 12, p. 17245. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21314-0>
- [4] Usman Kh., Marwat S., Ghulam S., Khan M.U., Khan N.; Khan M.A., Khalil S. Sewage Sludge: An Important Biological Resource for Sustainable Agriculture and Its Environmental Implications. *American J. of Plant Sciences*, 2012, v. 03(12), pp. 1708–1721. DOI:10.4236/ajps.2012.312209

- [5] Gorelova O.M., Titova K.Yu. *Issledovaniya ob utilizatsii aktivnogo ila* [Research on the activated sludge utilization]. Polzunovskiy vestnik [Polzunov Bulletin], 2015, no. 4, v. 1, pp. 114–118.
- [6] Panov V.P., Zykova I.V. *Utilizatsiya izbytochnykh aktivnykh ilov* [Utilization of excess activated sludge]. Ekologiya i promyshlennost' Rossii [Ecology and Industry of Russia], 2001, no. 12, pp. 29–30.
- [7] Panov V.P., Zykova I.V. *Izvlechenie tyazhelykh metallov iz izbytochnogo aktivnogo ila pri aerirovani* [Extraction of heavy metals from excess activated sludge during aeration]. Zhurnal prikladnoy khimii [J. of Applied Chemistry], 2005, iss. 4, pp. 608–612.
- [8] Panov V.P., Lysenko I.V., Zykova I.V. *K raspredeleniyu tyazhelykh metallov po sostavlyayushchim aktivnogo ila pri biologicheskoy ochistke stochnykh vod* [On the distribution of heavy metals according to the components of activated sludge in biological wastewater treatment]. Problemy ekonomiki i progressivnye tekhnologii v tekstil'noy, legkoy i poligraficheskoy otraslyakh promyshlennosti: sbornik nauchnykh trudov SPGUTD [Problems of Economics and Progressive Technologies in the Textile, Light and Printing Industries: Collection of Scientific Works of SPGUTD], 2004, no. 6, pp. 150–153.
- [9] Gorelova O.M., Titova R.Yu. *Issledovaniya po utilizatsii izbytochnogo aktivnogo ila* [Research on the disposal of excess activated sludge]. Polzunovskiy Bulletin, 2015, no. 4, v. 1, pp. 114–118.
- [10] Lyashenko E.S., Vasil'eva Zh.V. *Perspektivnye metody utilizatsii biomassy aktivnogo ila* [Promising methods of utilization of activated sludge biomass]. Okhrana okruzhayushchey sredy i zdorov'ya cheloveka v Rossiyskoy Federatsii i stranakh Evrosoyuza: sbornik materialov mezhd. nauchno-praktich. konferentsii [Environmental protection and human health in the Russian Federation and the EU countries: A collection of materials of the international scientific and practical conference], Murmansk, October 31, 2014. Murmansk: Murmanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskoy universitet, 2014, pp. 57–61.
- [11] Haile A., Gelebo G.G., Tesfaye T. Pulp and paper mill wastes: utilizations and prospects for high value-added biomaterials. *Bioresour. Bioprocess*, 2021, v. 8, p. 35. <https://doi.org/10.1186/s40643-021-00385-3>
- [12] Bondarchuk E.V., Tolmachev A.B., Sheptunov A.V. *Pererabotka osadkov stochnykh vod v pochvogrunt* [Processing of sewage sludge into soil]. Yakovlevskie chteniya: sbornik dokladov XVI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchenny pamyati akademika RAN S.V. Yakovleva [Yakovlev Readings: collection of reports of the XVI International Scientific and Technical Conference dedicated to the memory of Academician of the Russian Academy of Sciences S.V. Yakovleva], Moscow, March 15, 2021. Moscow: National Research Moscow State University of Civil Engineering, 2021, pp. 31–33.
- [13] Ruchay N.S., Markevich R.M. *Ekologicheskaya biotekhnologiya* [Ecological biotechnology]. Minsk: BSTU, 2006, 312 p.
- [14] *Natsional'nyy standart RF «Tekhnicheskie printsipy obrabotki osadkov stochnykh vod. Obshchie trebovaniya»* [National standard of the Russian Federation «Technical principles for the treatment of sewage sludge. General requirements»] Moscow: Rossiyskiy institut standartizatsii [Russian Institute for Standardization], 2021, 30 p.
- [15] Kulikova A.Kh., Zakharov N.G., Vandyshev I.A., Shaykin S.V., Karpov A.V. *Problema utilizatsii osadkov stochnykh vod (OSV) v kachestve udobreniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur* [The problem of disposal of sewage sludge (SSW) as a fertilizer for agricultural crops]. Vestnik Ul'yanovskoy sel'skokhozyaystvennoy akademii [Bulletin of the Ulyanovsk Agricultural Academy], 2007, no. 1, pp. 8–18.
- [16] Chebotarev N.T., Naydenov N.D., Yudin A.A. *Agroekologicheskaya otsenka primeneniya osadkov stochnykh vod v kachestve udobreniy sel'skokhozyaystvennykh kul'tur* [Agroecological assessment of the use of sewage sludge as fertilizers for agricultural crops]. Nauka. Mysl' [Nauka. Thought], 2016, no. 1–2, pp. 33–42.
- [17] Robonen E.V., Zaytseva M.I., Chernobrovkina N.P., Chernyshenko O.V., Vasil'ev S.B. *Opyt razrabotki i ispol'zovaniya koteynernykh substratov dlya lesnykh pitomnikov. Al'ternativnyy torfu* [Experience in the development and use of container substrates for forest nurseries. Peat alternatives]. Resources and Technology, 2015, 12 (1), pp. 47–76. DOI: 10.15393/j2.art.2015.3081
- [18] *Otsenka prigodnosti substrata dlya vyrashchivaniya posadochnogo materiala s zakrytymi kornyami* [Assessment of the suitability of the substrate for growing planting material with closed roots: Guidelines]. Comp. Belostotsky N.N., Birtseva A.A., Zhigunov A.V. Leningrad: LenNIILKh, 1984, 29 p.
- [19] Yakusheva T.V., Savitskaya N.V., Vyrodova S.A. *Sovremennyye podkhody k vyrashchivaniyu posadochnogo materiala khvoynykh porod s zks* [Modern approaches to the cultivation of planting material of coniferous trees with green plants]. Aktual'nye voprosy taezhnogo i pritundrovogo lesovodstva na Evropeyskom Severe Rossii [Current issues of taiga and tundra forestry in the European North of Russia]. Moscow: Publishing Technologies, 2023, pp. 413–418.
- [20] Kramarenko V.V. *Vliyaniye botanicheskogo sostava na fizicheskie svoystva torfa* [Influence of the botanical composition on the physical properties of peat]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennyye nauki [Izvestiya of the Tula State University. Natural Sciences], 2009, iss. 2, pp. 272–280.
- [21] Nosnikov V.V., Sokolovskiy I.V., Domasevich A.A., Yurenaya A.V., Granik A.M., Selishcheva O.A., Romanchuk A.V. *Ispol'zovanie metoda konduktometrii dlya otsenki kachestva substratov na osnove verkhovogo torfa* [Using the conductometry method to assess the quality of substrates based on high-moor peat]. Trudy BGTU [Proceedings of BSTU], 2018, ser. 1, no. 2, pp. 91–97.
- [22] Misnikov O.S., Pukhova O.V., Chertkova E.Yu. *Fiziko-khimicheskie osnovy torfyanogo proizvodstva* [Physical and chemical bases of peat production]. Tver: Tver State Technical University, 2015, 168 p.
- [23] Nakvasina E.N., Lyubova S.V. *Pochvovedeniye* [Soil science], Arkhangelsk: NArFU, 2016, 146 p.
- [24] Gitis L.Kh. *Statisticheskaya klassifikatsiya i klasternyy analiz* [Statistical classification and cluster analysis]. Moscow: Moscow State Mining University], 2003, 157 p.
- [25] Dubovskaya L.I., Knyazev G.B. *Komp'yuternaya obrabotka dannykh metodami mnogomernoy prikladnoy statistiki* [Computer data processing by methods of multivariate applied statistics]. Tomsk: TML-Press, 2011, 120 p.
- [26] *Substraty torfiano-perlitnye: tekhnicheskie usloviya TU BY 100061961.002–2015* [Substrates peat-pearlite specifications TU BY 100061961.002–2015]. Available at: <https://mlh.by/lioh/2015-5/3.pdf> (accessed 12.01.2023).
- [27] Dumroese R.K., Pinto J., Heiskanen J., Tervahauta A., McBurney K., Page-Dumroese D., Englund K. Biochar Can Be a Suitable Replacement for Sphagnum Peat in Nursery Production of Pinus ponderosa Seedlings. *Forests*, 2018, v. 9, p. 232.
- [28] Romanov E.M. *Vyrashchivaniye seyantsev drevesnykh rasteniy: bioekologicheskie i agrotekhnicheskie aspekty* [Growing seedlings of woody plants: bioecological and agrotechnical aspects]. Yoshkar-Ola: MarGTU, 2000, 500 p.
- [29] Zhigunov A.V. *Teoriya i praktika vyrashchivaniya posadochnogo materiala s zakrytoy kornevoy sistemoy dlya lesovosstanovleniya* [Theory and practice of growing planting material with a closed root system for reforestation]. Dis. Dr. Sci. (Agric.) 06.03.01], 1998, 40 p.

- [30] Zhigunov A.V., Sokolov A.I., Kharitonov V.A. *Vyrashchivanie posadochnogo materiala s zakrytoy kornevoy sistemoy v Ust'yanskom komplekse* [Growing planting material with a closed root system in the Ustyansky complex. Practical recommendations]. Petrozavodsk: Kareli'skiy nauchnyy tsentr RAN [Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2016, 43 p.
- [31] Yeager T.H., Fare D.C., J. Lea-Cox J. Best management practices: Guide for producing container-grown plants, Southern Nurserymen's Assoc., 2007, no. 3, pp. 200–203.
- [32] López-López N., Segarra G., Vergara Diaz O., López-Fabal A., Trillas M.I. Compost from forest cleaning green waste and *Trichoderma asperellum* strain T34 reduced incidence of *Fusarium circinatum* in *Pinus radiata* seedlings. *Biological Control*, 2015, v. 95. DOI 10.1016/j.biocontrol.2015.12.014
- [33] Abaurre G.W., Alonso J.M., Saggin Júnior O.J., de Faria S.M. Sewage Sludge Compared with Other Substrates in the Inoculation, Growth, and Tolerance to Water Stress of *Samanea saman*. *Water*, 2021, v. 13, p. 1306. <https://doi.org/10.3390/w13091306>
- [34] *Spravochnik po lesnym pitomnikam* [Directory of forest nurseries]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forestry industry], 1983, 280 p.
- [35] Mukhortov D.I., Antropova A.V. *Rost i razvitie seyantsev sosny obyknovennoy v konteynerakh pri ispol'zovanii substratov razlichnoy plotnosti slozheniya* [Growth and development of seedlings of Scotch pine in containers using substrates of different density of addition]. *Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distantsionnyy monitoring: mezhdunarodnyy sbornik nauchnykh statey* [Forest ecosystems under climate change: biological productivity and remote monitoring: international collection of scientific articles]. Ed. E.A. Kurbanov. Yoshkar-Ola: Volga State Technological University, 2019, pp. 42–53.
- [36] Wall A., Heiskanen J. Effect of air-filled porosity and organic matter concentration of soil on growth of *Picea abies* seedlings after transplanting // *Scandinavian J. of Forest Research*, 2003, v. 18, iss. 4, pp. 344–350. DOI: 10.1080/02827580310001742
- [37] Teben'kova D.N., Lukina N.V., Vorob'ev R.A., Orlova M.A. *Vskhozhest' semyan i biometricheskie parametry seyantsev na substratakh iz tverdykh otkhodov tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti* [Seed germination and biometric parameters of seedlings on substrates from solid waste of the pulp and paper industry]. *Lesovedenie* [Forest science], 2014, no. 6, pp. 30–41.
- [38] Nakvasina E.N. *Ritmika rosta seyantsev sosny i eli. Bioekologicheskoe obosnovanie agrotekhniki vyrashchivaniya* [Growth rhythm of pine and spruce seedlings. Bioecological substantiation of agrotechnics of cultivation]. Arkhangel'sk: NArFU, 2016, 158 p.
- [39] Isaeva A.M. *Obrabotka i utilizatsiya osadkov stochnykh vod* [Treatment and disposal of sewage sludge]. Penza: PGUAS, 2013, 128 p.
- [40] D'yakov M.S., Vaysman Ya.I., Glushankova I.S. *Ekologicheski bezopasnyy sposob utilizatsii tverdykh otkhodov biokhimicheskikh ochistnykh sooruzheniy s polucheniem produktov, obladayushchikh tovarnymi svoystvami* [Ecologically safe method of utilization of solid wastes of biochemical treatment facilities with obtaining products with commercial properties]. *Ekologia i promyshlennost' v Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2013, no. 11, pp. 53–61.

Acknowledgments

The authors are grateful to E.M. Romanov and A.A. Gorelova, E.S. Moiseeva, P.A. Saulina, A.A. Igamberdieva for help in preparing substrate compositions; A.M. Antonov and G.A. Ivanov for providing composted sludge.

The research was supported by the World-class Scientific and Educational Center «Russian Arctic: New Materials, Technologies and research Methods», Subproject 4 «Research and selection the optimal composition of the substrate (soil) for growing seedlings of coniferous species to the reforestation conditions on the forest raw material base of the enterprises of OOO PKP «Titan» and «Arkhangel'sk Pulp and Paper Mill».

Authors' information

Nakvasina Elena Nikolaevna  — Dr. Sci. (Agriculture), Professor of the Department of Forestry and Forest Management of Northern Arctic Federal University named after M.V. Lomonosov, nakvasina@yandex.ru

Koptev Sergey Viktorovich — Dr. Sci. (Agriculture), Associate Professor, Head of the Department of Forestry and Forest Management of Northern Arctic Federal University named after M.V. Lomonosov, s.koptev@narfu.ru,

Nikitina Maria Viktorovna — Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor of the Northern Arctic Federal University named after M.V. Lomonosov, m.nikinina@narfu.ru

Received 14.06.2023.

Approved after review 23.01.2024.

Accepted for publication 22.03.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article
The authors declare that there is no conflict of interest