

Изучение возможности использования отходов целлюлозно-бумажной промышленности для рекультивации техногенных ландшафтов

Мосендз И.А. ^{1,2}, Иванова Т.К. ^{1,2}, Слуковская М.В. ^{1,2}, Кременецкая И.П. ²

¹ Центр наноматериаловедения ФИЦ КНЦ РАН, Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики, Апатиты, ia.mosendz@ksc.ru; tk.ivanova@ksc.ru; m.slukovskaya@ksc.ru

² Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева КНЦ РАН, Апатиты, i.kremenetskaia@ksc.ru

Аннотация. Актуальной проблемой в области промышленной экологии является утилизация много-тоннажных отходов целлюлозно-бумажной промышленности (скопа). Скоп относится к категории почво-грунтов и может быть использован для создания почвосмесей. В лабораторных условиях изучены физико-химические свойства почвосмесей на основе скопа и техногенных материалов различного происхождения: деградированный подзол, кварцевые и нефелиновые отходы предприятий Мурманской области. Определены показатели, характеризующие физико-химические свойства полученных почвосмесей – влагоудерживающая способность, влажность, pH водной и солевой суспензии, доступные для питания растений компоненты. Проведена оценка фитотоксичности полученных почвосмесей в краткосрочном и долгосрочном опытах. Полученные результаты показали, что использование данных отходов представляется возможным при ремедиации деградированного подзола, добавление в подзол скопа в минимальном количестве (10 мас. %) позволяет повысить влагоемкость и снизить кислотность субстрата до нормативных значений. Кварцевые отходы Оленегорского ГОКа при дополнительной корректировке кислотно-основных свойств являются перспективным материалом для почвенного конструирования.

Ключевые слова: деградированный подзол, отходы, скоп, ремедиация, почвосмесь.

Study of osprey as perspective material for the reclamation of industrial landscapes

Mosendz I.A. ^{1,2}, Ivanova T.K. ^{1,2}, Slukovskaya M.V. ^{1,2}, Kremenetskaya I.P. ²

¹ Laboratory of Nature-Inspired Technologies and Environmental Safety of the Arctic, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, ia.mosendz@ksc.ru

² Tananaev Institute of Chemistry - Subdivision of the Federal Research Centre “Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences”, Apatity, i.kremenetskaia@ksc.ru

Abstract. An urgent problem in the industrial ecology is the disposal of large-tonnage waste from the pulp and paper industry (osprey). The osprey can be used to create artificial soil mixtures. Under laboratory conditions, the physicochemical properties of soil mixtures based on osprey and industrial materials of various technogenic nature were studied: degraded podzol, quartz and nepheline waste from the enterprises of the Murmansk region. The indicators characterizing the physicochemical properties of the resulting soil mixtures were determined - water-holding capacity, humidity, pH of water and salt suspensions, content of components available for plant nutrition. An assessment of the phytotoxicity of the obtained soil mixtures in short-term and long-term experiments is presented. The results showed that the use of these wastes seems possible in the remediation of degraded podzol, the addition of osprey to the podzol in a minimum amount (10 wt. %) makes it possible to increase the moisture capacity and reduce the acidity of the substrate to standard values. Quartz wastes from the Olenegorsk GOK, with additional adjustment of acid-base properties, are a promising material for creating artificial soil mixtures for soil design.

Keywords: degraded podzol, waste, sewage sludge from pulp and paper products, remediation, soil mixture.

Введение

Почва является важным природным ресурсом, который необходимо сохранять и по возможности улучшать его качество и продуктивность (Pascual et al., 2000). Деградация почв пред-

ставляет собой совокупность природных и антропогенных процессов, приводящих к изменению функций почв, количественному и/или качественному ухудшению состава и свойств, снижению природно-хозяйственной значимости земель (Хитров и др., 2007). Состояние почвенного покрова России является далеко не удовлетворительным, а в ряде областей даже критическим. Мурманская область – промышленный регион в Арктической зоне с высоким уровнем урбанизации, где основным источником загрязнения окружающей среды является горнодобывающая и металлургическая промышленность. Последние годы предприятиями проводится большая работа по модернизации технологий и снижению воздействия на природную среду. Однако объем текущих промышленных отходов остается все еще значительными, следует также учитывать наличие солидного накопленного ущерба.

В настоящей работе исследована возможность применения отходов целлюлозно-бумажной промышленности (скопа) в целях ремедиации техногенно нарушенных территорий. Скоп представляет собой отход, образующийся в процессе очистки сточных вод предприятий по переработке древесины. Скоп имеет высокую влажность и содержит в своем составе короткие целлюлозные волокна. В соответствии с классификатором отходов скоп относится к группе VII «Отходы целлюлозы, бумаги, картона» и имеет 4 класс опасности. Несмотря на постоянное совершенствование технологий целлюлозно-бумажной промышленности и попытки рециклинга скопа в технологическом процессе, полностью избежать его образования и накопления не представляется возможным.

Скоп является сложным для переработки отходом из-за его высокой влажности, большие объемы обуславливают необходимость отвода значительных площадей для его захоронения. Возвратить скоп повторно в производство в количестве более 10 % не позволяют возникающие нарушения технологического процесса и существенное снижение качества продукции из-за повышения содержания в ней короткого целлюлозного волокна.

Материалы и методы

Проба отходов целлюлозно-бумажной промышленности (скопа) предоставлена АО «Сегежская ЦБК» (г. Сегежа, республика Карелия). Данный материал, согласно стандарту предприятия (СТО 51321438-030-2015), относится к категории почвогрунтов и состоит из обезвоженного осадка сточных вод, который был выдержан в буртах с периодическим перемешиванием для аэрации, с добавлением (или без добавления) песка и растительных материалов (опилок, стружки, соломы и т. п.) до полного созревания. Проба скопа была просушена при комнатной температуре 18–20 °С до воздушно-сухого состояния, после высушивания материал был пропущен через ножевую мельницу РМ 120М с решеткой разгрузочной из перфорированного полотна толщиной 1.0 мм с отверстиями Ø 3 мм.

Характеристика техногенных материалов. Кварцевые отходы (ОХ) (АО «Олкон», г. Оленегорск, Мурманская область) образуются при переработке железистых кварцитов и производстве железорудного концентрата (Суворова и др., 2012). После обогащения железных руд образуются мелкозернистые отходы, миллионы кубометров которых ежегодно сбрасываются в хвостохранилище. Фактическая масса размещения отходов составляет величину порядка 54 млн т/год. Кислотность водной вытяжки – 8.07. Химический состав использованных в работе материалов приведен в таблице 1.

Нефелиновые отходы (ЛХ) (ООО «Ловозерский горно-обогатительный комбинат», пгт. Ревда, Мурманская область) образуются в результате переработки лопаритовых руд с последующим получением концентрата редкоземельных металлов, а также ниобия и тантала. Фактическая масса размещения отходов составляет 400 тыс. т/год. Кислотность водной вытяжки – 8.89.

Деградированный подзол (ПД) отобран на территории вблизи АО «Кольская ГМК» (г. Мончегорск, Мурманская область). Значительное валовое содержание меди и никеля (0.12 и 0.05 мас. % соответственно), а также большая доля металлов в подвижной фракции относительно валового содержания позволяют отнести подзол к почвам с высокой степенью загрязнения. Доля подвижной фракции металлов составляет (%): Cu – 58, Ni – 45, Pb – 36, Fe – 26, Al – 20. Кислотность водной

вытяжки почвы – 4.2...4.8, содержание органического углерода – 1.3 %, из которого содержание углерода гуминовых кислот – 0.35 %, содержание общего азота – 0.07 %, из которого 2.5...4.0 мг/кг нитратного азота и 0.8 мг/кг – аммонийного азота (Иванова и др., 2021).

Таблица 1. Химический состав материалов, мас. %

Table 1. Materials chemical composition, wt. %

Компоненты	Материалы		
	ОХ	ЛХ	ПД
ппп (1000□)	0.10	0.15	9.00
Na ₂ O	–	13.33	–
MgO	2.90	0.45	4.43
Al ₂ O ₃	4.00	22.47	17.13
SiO ₂	66.80	48.08	55.23
P ₂ O ₅	0.07	0.79	0.20
S	0.14	0.08	0.18
K ₂ O	0.90	4.24	1.40
CaO	4.80	1.63	3.71
TiO ₂	0.20	1.10	0.76
Cr ₂ O ₃	–	–	0.08
MnO	0.24	0.23	0.12
Fe ₂ O ₃	19.70	6.03	7.42
NiO	–	–	0.12
CuO	–	–	0.05
Сумма	99.85	98.58	99.82

Примечание: ОХ – кварцевые хвосты (АО «Олкон», г. Оленегорск, Мурманская область); ЛХ – нефелиновые хвосты (ООО «Ловозерский горно-обогатительный комбинат», пгт. Ревда, Мурманская область); ПД – деградированный подзол (территория вблизи АО «Кольская ГМК»; г. Мончегорск, Мурманская область).

Методы исследования. Максимальную влагоудерживающую способность (полевую влажность) определяли согласно ГОСТ 32632-2014. Для определения pH использовали анализатор жидкости pH-метр-иономер «Эксперт-001» со стеклянным лабораторным электродом ЭСЛ-63-07СР и электродом вспомогательным лабораторным хлорсеребряным ЭВЛ-1МЗ.1.

Содержание компонентов в потенциально доступной фракции определяли путем обработки образцов почвосмесей (20 г) раствором 0.2н HCl (100 мл), перемешивания (1 мин), встряхивания (15 мин) и фильтрования через фильтровальную бумагу «синяя лента» с размером пор 2–3 мкм. Растворы анализировали на эмиссионном спектрометре ICPS-9000 фирмы Shimadzu (Япония).

Фитотестирование проведено двумя методами – с использованием горчицы белой (*Sinapis alba* L.) и бархатцев прямостоячих (*Tagetes patula* L.) (Choudhury et al., 2016; Тишин, Тишина, 2021). Семена горчицы помещали в пластиковые контейнеры с подготовленными увлажненными почвосмесями по 30 штук в каждом опыте. Проращивание происходило при стабильной температуре 20–22°C в течение 5 дней до пика роста культуры. Ежедневно семена проверяли на прорастание и состояние увлажненности, при необходимости смачивали почвосмеси водопроводной водой комнатной температуры, не допуская переувлажнения. На третьи сутки эксперимента определяли энергию прорастания семян, после завершения периода выращивания рассчитывали всхожесть. Показателями всхожести и энергии прорастания семян является доля семян, проросших на пятые и третьи сутки, соответственно, от количества семян, взятых для проращивания, выраженная в процентах.

Семена бархатцев предварительно проращивали на фильтровальной бумаге в чашках Петри в течение трех дней. Далее пророщенные таким способом семена помещали в предварительно увлажненные почвосмеси по 3 штуки в каждом опыте. Проращивание происходило при стабильной температуре 20–22°C в течение 14 дней. Ежедневно семена проверяли на прорастание и состояние

увлажненности, при необходимости смачивали почвосмеси водопроводной водой комнатной температуры, не допуская переувлажнения. Ежедневно измеряли высоту бархатцев, после завершения периода выращивания определяли суммарную площадь листовых пластин каждого растения.

Результаты и обсуждение

Характерной особенностью техногенно загрязненного подзола и отходов обогащения являются неудовлетворительные гидрофизические свойства, прежде всего низкая влагоудерживающая способность. Серьезной проблемой, которая возникает при проведении работ по задержанию данных материалов, является недостаток влаги в периоды летней вегетации. Скоп, напротив, хорошо удерживает влагу, и может быть использован для повышения влажности почвосмесей до благоприятных для растений значений. Для корректировки гранулометрического состава техногенных материалов, а именно недостатка мелкой фракции, использована глина. Для фитотестирования были подготовлены почвосмеси, состоящие из техногенных материалов, скопа и глины в разных соотношениях, схема опытов представлена в таблице 2.

Таблица 2. Соотношение компонентов в почвосмесях

Table 2. The ratio of components in the mixture

Вариант состава почвосмеси	Содержание, мас. %		
	ПД/ОХ/ЛХ	Глина	Скоп
C0	100	–	–
C1	90	–	10
C2	80	–	20
C3	70	–	30
C11	80	10	10
C12	70	10	20

Примечание: ПД – деградированный подзол (Территория вблизи АО «Кольская ГМК», г. Мончегорск, Мурманская область); ОХ – кварцевые хвосты (АО «Олкон», г. Оленегорск, Мурманская область); ЛХ – нефелиновые хвосты (ООО «Ловозерский горно-обогатительный комбинат», пгт. Ревда, Мурманская область)

Результаты определения максимальной влагоудерживающей способности показали, что при добавлении в смеси скопа происходило планомерное увеличение показателя, при этом добавление глины в состав почвосмеси не оказывало влияния на влагоудерживающую способность (рис. 1 а). Наиболее высокие значения данного показателя были получены для почвосмесей с 30 % скопа в составе. Таким образом, для подбора оптимальных условий при произрастании растений следует оперировать только количеством добавляемого скопа в почвосмесь. Аналогичные зависимости получены и при определении влажности почвосмесей (рис. 1 б). Наибольший процент влажности почвосмеси был получен при соотношении глина:скоп 0:30 %. Глина, как и при определении максимальной влагоудерживающей способности, не оказывала влияния на значения влажности.

Кварцевые и нефелиновые отходы, изначально являющиеся щелочными материалами, при взаимодействии со скопом и глиной увеличивали показатели pH в почвосмесях на 1–2 единицы (рис. 2 а), при этом через семь дней выдержки уровень pH во всех опытах снижался до оптимальных для произрастания растений кислотнo-щелочных условий (pH 7.7–8.9) (рис. 2 б) в результате поглощения атмосферного CO₂ сильнощелочным раствором и образования новых фаз.

Значения кислотности почвосмесей, близкие к нейтральным, получены в опытах с использованием деградированного подзола (рис. 2). При добавлении глины и скопа кислая среда суспензии подзола (pH 4.41) в течение 10 минут изменялась, pH поднималось до значений от 6.8 до 7.7 в зависимости от соотношения компонентов. Наибольшее влияние на значения pH оказывало добавление в смесь 30 % скопа, в смесях с глиной происходило снижение показателя pH. Равновесие системы в опыте с использованием деградированного подзола наступало на седьмые сутки взаимодействия материалов с водным раствором, значения pH становились равными 7.5 независимо от количества добавляемых компонентов. Известно, что для большинства растений на ранних стадиях онтогенеза

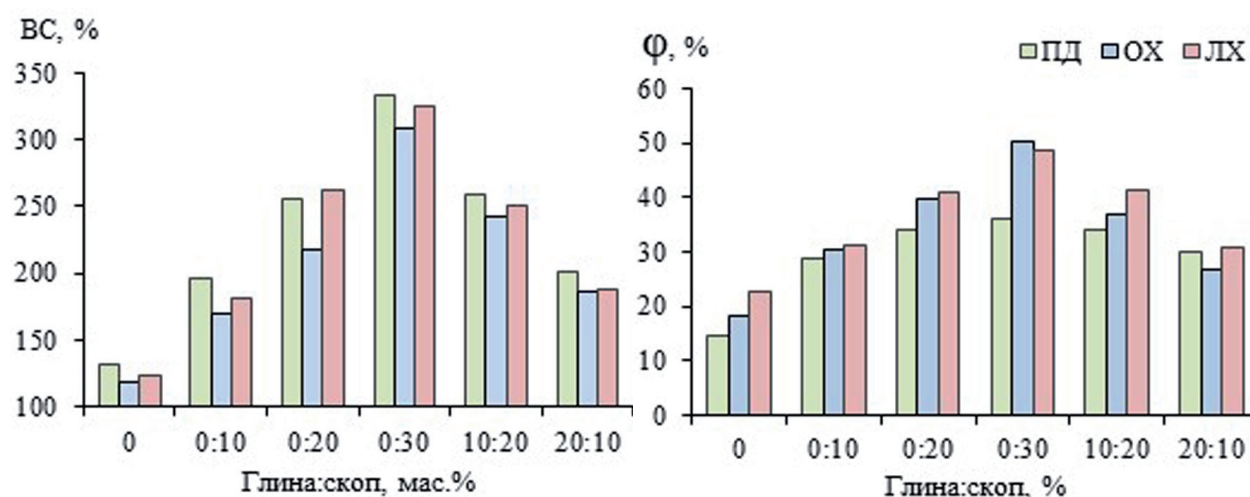


Рис. 1. Влагоудерживающая способность (а) и влажность (б) почвосмесей различного состава.

Fig. 1. Water-holding capacity (a) and moisture (b) of soil mixtures of various compositions.

требуется среда, близкая к нейтральной. Таким образом, можно говорить о том, что почвосмеси с деградированным подзолом характеризуются наиболее подходящими кислотно-основными условиями для выращивания растений.

Определено содержание компонентов в почвосмесях по Кирсанову (табл. 3). Зеленым цветом выделены показатели, соответствующие благоприятным условиям произрастания растений, красным – неблагоприятным. Выявлено существенное увеличение содержания кальция и магния в почвосмесях, пропорциональное содержанию скопа. Добавление глины не оказывает влияния на концентрацию данных компонентов. В сериях ПД и ОХ увеличивается содержание натрия, в серии ЛХ оно снижается за счет разбавления исходного материала, в котором натрия содержится в экстремально высокой концентрации. Аналогичная зависимость наблюдается для кремния. Отметим, что в серии ЛХ содержание подвижного кремния на порядок больше, чем в опытах с ПД и ОХ. На содержание железа добавки практически не влияют.

В вариантах ПД и ОХ наблюдаются повышенные концентрации калия, а в серии ЛХ – экстремально высокие концентрации как калия, так и фосфора (Методические..., 2003). Значения pH_{KCl} соответствуют нормативным требованиям в вариантах исходных кварцевых и нефелиновых отходов, а также при внесении корректирующих добавок в подзол. По совокупности данных о химических свойствах почвосмесей можно сделать вывод о том, что относительно благоприятными условия произрастания растений могут быть в серии ПД, а самые неблагоприятные – в серии ЛХ.

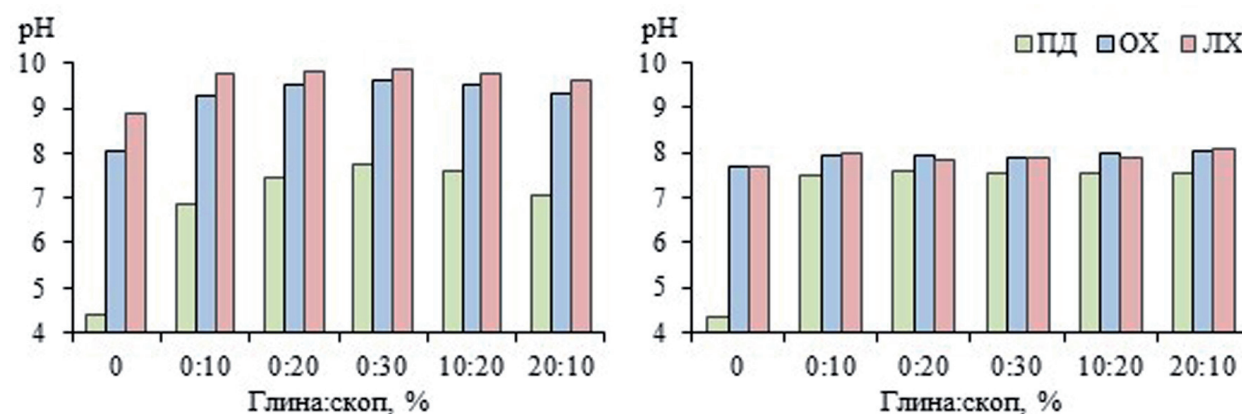


Рис. 2. Значения pH_{H_2O} (10 мин) (а) и pH_{H_2O} (7 сут) (б) почвосмесей разного состава.

Fig. 2. Soil mixture pH_{H_2O} (10 min) (a) and pH_{H_2O} (7 day) (b).

Таблица 3. Содержание компонентов по Кирсанову и pH_{KCl} почвосмесей
 Table 3. Kirsanov component content and pH_{KCl} of soil mixtures

Вариант состава почвосмеси	pH _{KCl}	Содержание компонентов						
		г/кг					мг/кг	
		Ca	Mg	Na	Si	Fe	K	P
ПД								
C0	4.39	0.045	0.001	0.005	0.175	0.05	130	1
C1	6.75	3.15	0.035	0.075	0.17	0.07	125	1
C2	7.14	8.5	0.08	0.225	0.15	0.065	125	5
C3	7.7	9.35	0.025	0.33	0.125	0.035	125	15
C11	7.29	6.9	0.03	0.21	0.145	0.045	125	20
C12	6.99	4.55	0.065	0.135	0.07	0.065	135	135
ОХ								
C0	7.78	0.65	0.015	0.02	0.09	0.045	130	30
C1	8.79	6.25	0.035	0.15	0.11	0.115	145	45
C2	8.54	8.05	0.085	0.21	0.1	0.12	135	45
C3	8.43	10.25	0.045	0.325	0.105	0.085	140	45
C11	8.39	8.7	0.065	0.215	0.115	0.215	150	55
C12	8.28	4.75	0.075	0.09	0.145	0.415	160	60
ЛХ								
C0	7.45	0.17	0.015	1	1.05	0.015	290	95
C1	8.7	4.35	0.02	1.15	1.15	0.065	330	105
C2	8.71	7.3	0.025	0.95	0.8	0.07	275	85
C3	8.41	9.7	0.025	0.9	0.6	0.08	245	75
C11	8.4	8.2	0.05	0.9	0.7	0.165	250	80
C12	8.45	4.4	0.045	0.7	0.7	0.27	250	85

Оценка фитотоксичности подтвердила выводы, сделанные на основании физико-химических данных. Энергия прорастания семян горчицы для почвосмесей с деградированным подзолом находилась на достаточно высоком и стабильном уровне, что говорит о хорошей выживаемости растений в данном опыте (рис. 3 а). Всхожесть семян горчицы почвосмеси с деградированным подзолом возрастает по мере увеличения доли скопа в составе почвосмесей. При использовании в почвосмесях кварцевых и нефелиновых отходов наблюдалось увядание, прекращение развития проростков, наибольшая фитотоксичность отмечена для почвосмесей с использованием нефелиновых отходов (рис. 3 а). Не только количество проросших семян, но и внешний вид проростков горчицы наглядно демонстрировал увеличение острой фитотоксичности в ряду от почвосмесей на основе подзола к вариантам с кварцевыми и далее с нефелиновыми отходами (рис. 4).

Опыты по определению хронической фитотоксичности позволили уточнить наиболее благоприятный состав почвосмеси (рис. 5). В целом полученные результаты соответствуют физико-химическим показателям таблицы 3. Прослеживается существенное влияние кислотно-щелочных условий, значительное понижение или превышение значений pH относительно нормативного интервала pH 6.5–7.5 отрицательно влияет на растения. Данное обстоятельство особенно проявляется в опытах с нефелиновыми отходами, в меньшей степени – с кварцевыми (рис. 5). В серии с подзолом наилучший показатель получен при содержании скопа 10 мас. %, далее с увеличением количества корректирующих добавок в смеси токсичность увеличивается. Для интерпретации полученного результата необходимы дополнительные исследования. В то же время данное количество скопа является приемлемым с точки зрения трудозатрат при проведении работ по созданию травяного покрова на техногенном подзоле.

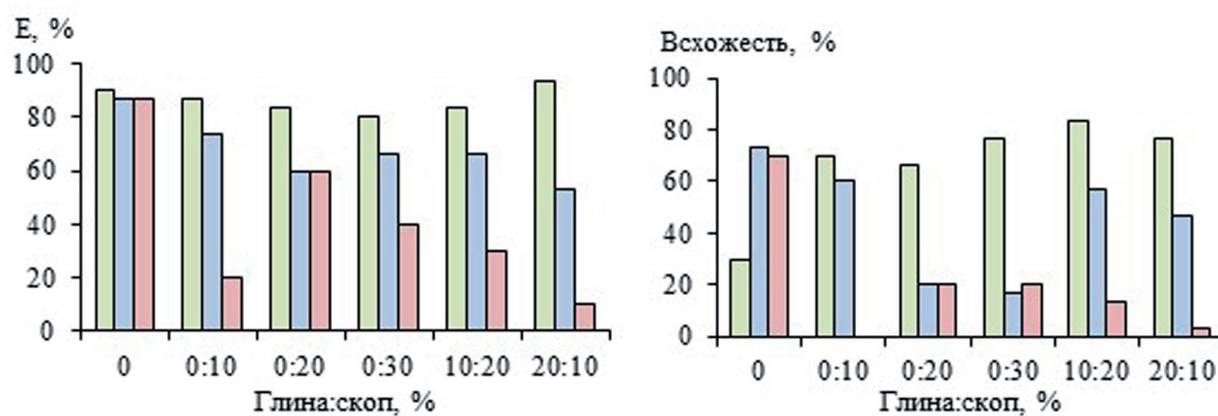


Рис. 3. Энергия прорастания Е (а) и всхожесть (б) семян горчицы в зависимости от доли добавляемых компонентов в почвосмесях.

Fig. 3. Germination energy (a) and germination (b) of seeds *Sinapis alba* L. depending on amount of added components in soil mixture.

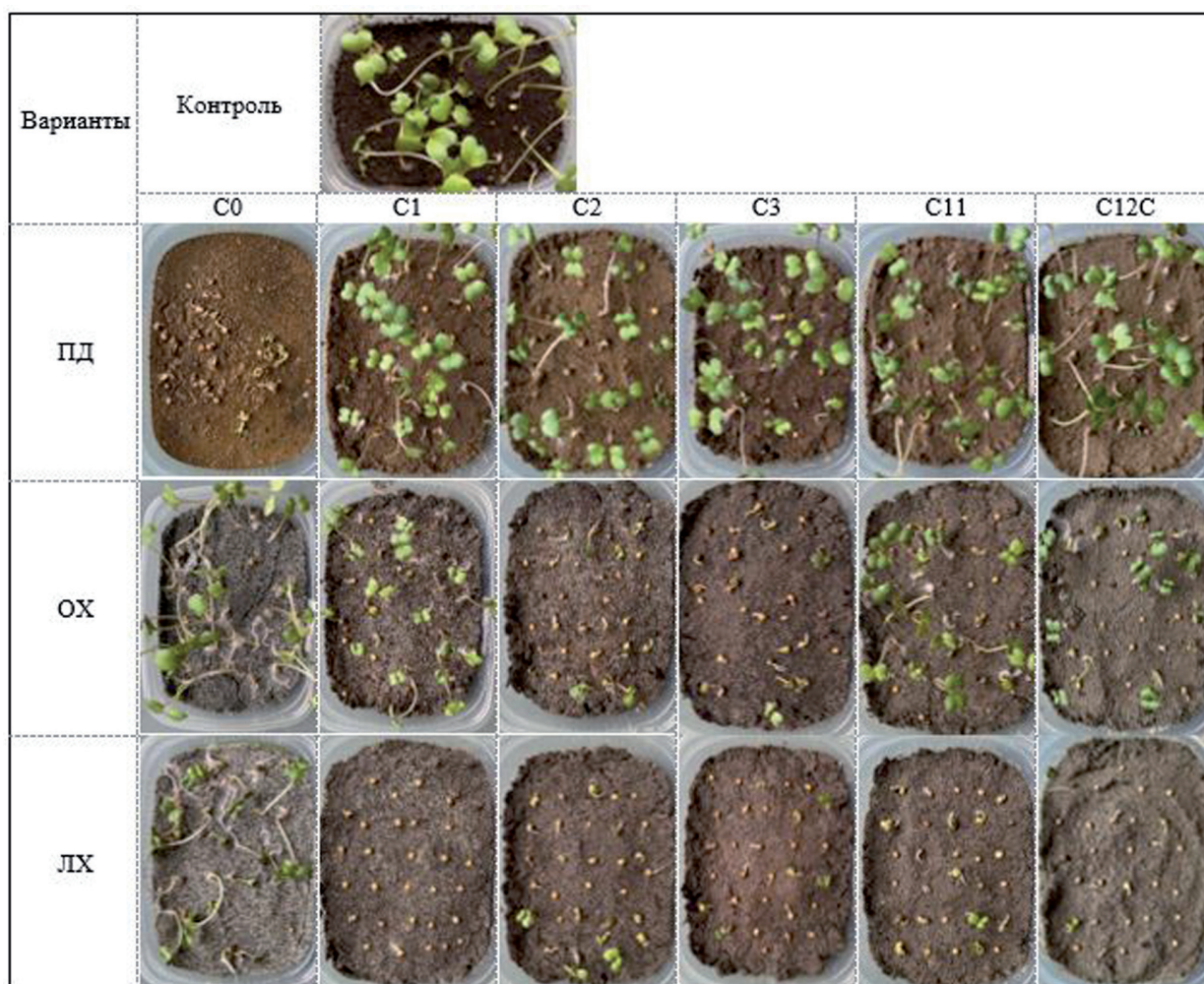


Рис. 4. Внешний вид семян и проростков *Sinapis alba* L. на пятый день эксперимента.

Fig. 4. Appearance of seeds and seedlings of *Sinapis alba* L. on the fifth day of the experiment.

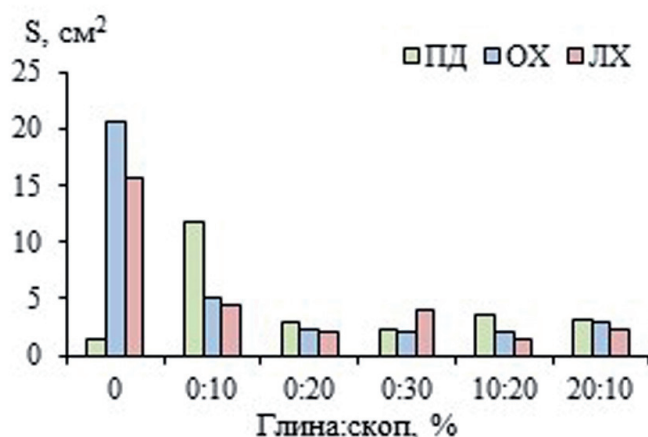


Рис. 5. Суммарная площадь листьев *Tagetes patula* L., выращенных на субстратах различного состава.

Fig. 5. Total area of *Tagetes patula* L. marigold leaves grown on soil mixture of various composition.

Растения бархатцев в варианте С1 в серии с подзолом после формирования нескольких листьев остановились в своем развитии (рис. 6). Возможной причиной является недостаток питательных веществ, а именно фосфора. Его содержание в смеси (1 мг/кг) существенно меньше уровня достаточной обеспеченности (55 мг/кг) (Методические..., 2003).

Вар-т	ПД	ОХ	ЛХ
С0			
С1			
С2			
С3			
С11			
С12			

Рис. 6. Внешний вид листьев *Tagetes patula* L. на 14-й день опыта.

Fig. 6. Appearance of the leaves of *Tagetes patula* L. on the 14th day of the experiment.

Выводы

Использование целлюлозосодержащих отходов (скопа) эффективно улучшает гидрофизические свойства минеральных техногенных грунтов и песчаных промышленных отходов. Наличие в скопе щелочных компонентов способствует нейтрализации материалов с повышенной кислотностью (загрязненный подзол) и увеличивает щелочность субнейтральных кварцевых и нефелиновых отходов. Совокупность данных о гидрофизических и химических свойствах почвосмесей позволяет сделать вывод о том, что относительно благоприятными условия произрастания растений могут быть в серии с подзолом, а самые неблагоприятные – при использовании нефелиновых отходов.

Фитотестирование почвосмесей в краткосрочном опыте с горчицей подтвердило, что наиболее подходящие условия для произрастания растений наблюдаются в опытах с использованием деградированного подзола. Добавление в подзол скопа в минимальном количестве (10 мас. %) позволяет повысить влагоемкость и снизить кислотность субстрата до нормативных значений.

Замедление растений в развитии в долгосрочном опыте по фитотестированию с использованием бархатцев свидетельствует о необходимости корректировки условий произрастания растений. Прежде всего, следует обратить внимание на сбалансированность элементов питания. В настоящей работе проанализирована обеспеченность почвосмесей по таким элементам питания, как калий и фосфор. В вариантах с подзолом наблюдается низкая обеспеченность по фосфору, в опытах с нефелиновыми отходами – экстремально высокая как по фосфору, так и по калию. С точки зрения содержания калия и фосфора оптимальными являются почвосмеси с кварцевыми отходами, которые при условии корректировки кислотно-основных свойств являются перспективным материалом для создания искусственных почвосмесей.

Благодарности

Авторы работы выражают благодарность АО «Сегежская ЦБК» за предоставление материала для проведения работ.

Работа выполнена в рамках темы НИР (FMEZ-2022-0022), фитотестирование выполнено при поддержке гранта РНФ (№ 21-77-10111).

Литература

1. Иванова Т.К., Слуковская М.В., Мосендз И.А., Красавцева Е.А., Максимова В.В., Канарейкина И.П., Широкая А.А., Кременецкая И.П. Модифицированные материалы на основе слоистых силикатов как мелиоранты для ремедиации подзола техногенной пустоши // Вестник РУДН. Серия: Агрономия и Животноводство. 2021. Т. 16. № 4. С. 370–388. <https://doi.org/10.22363/2312-797X-2021-16-4-370-388>.
2. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения // М.: ФГНУ «Росинформагротех». 2003. 240 с.
3. Суворова О.В., Лашук В.В., Макаров Д.В., Бокарева В.А., Кожина И.С. Исследование отходов обогащения железистых кварцитов как сырья для получения строительной керамики // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2012. № 9. С. 366–369.
4. Тишин А.С., Тишина Ю.Р., Методы и способы фитотестирования почв: обзор // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 11 (113). Ч. 2. С. 93–98. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.113.11.052>.
5. Хитров Н.Б., Иванов А.Л., Завалин А.А., Кузнецов М.С. Проблемы деградации, охраны и пути восстановления продуктивности земель сельскохозяйственного назначения // Научные и образовательные аспекты развития АПК. Вестник Орел ГАУ. 2007. № 6. С. 29–32.
6. Choudhury M.R., Islam M.S., Ahmed Z.U., Nayar F. Phytoremediation of heavy metal contaminated buriganga riverbed sediment by Indian mustard and marigold plants // Environ Prog Sustain Energy. 2016. V. 35. P. 117–124. <https://doi.org/10.1002/ep.12213>
7. Pascual J.A., Garcia C., Hernandez T. Soil microbial activity as a biomarker of degradation and remediation processes // Soil Biology & Biochemistry. 2000. V. 32. P. 1877–1883.