

УДК 622.013.37+[622.85:504.064]
DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-159-171

ПОВЫШЕНИЕ БИОГЕННОСТИ ТЕХНОГРУНТОВ ПРИ СОЗДАНИИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА КАК СПОСОБА КОНСЕРВАЦИИ ХВОСТОХРАНИЛИЩ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

Тамара Тимофеевна Горбачева

Институт проблем промышленной экологии Севера ФИЦ «Кольский научный центр РАН», 184209, Россия, г. Апатиты, мкр. Академгородок, 14а, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологии промышленного производства, тел. (815)557-93-37, e-mail: podzol_gorby@mail.ru

Любовь Андреевна Иванова

Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н. А. Аврорина, Кольский научный центр РАН, 184256, Россия, г. Кировск, ул. Ботанический сад, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: ivanova_la@inbox.ru

Анжела Владимировна Румянцева

Череповецкий государственный университет, 162600, Россия, г. Череповец, проспект Луначарского, 5, кандидат биологических наук, доцент, e-mail: a-v-rum@yandex.ru

Виктория Вячеславовна Максимова

ФИЦ «Кольский научный центр» РАН, 184209, Россия, г. Апатиты, мкр. Академгородок, 14а, младший научный сотрудник лаборатории природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики, e-mail: fourthmax@mail.ru

В статье проведен обзор отечественной и международной практики применения муниципальных стоков в качестве нетрадиционного химического мелиоранта с удобрительным эффектом на полях орошения, в гидропонных системах, а также отвалах вскрышных пород и отходов рудообогащения при проведении на них рекультивационных мероприятий. Объектом исследований являлись отходы рудообогащения («хвосты») апатит-нефелиновой фабрики АНОФ-2 КФ АО «Апатит» с преобладанием в их составе нефелиновых песков. Хвостохранилище включено в перечень объектов накопленного экологического ущерба в регионе, но благодаря богатому минеральному составу признается техногенным месторождением, подлежащим консервации для получения в перспективе апатитового, нефелинового, сфенового, эгиринового и титаномагнетитового концентратов. Целью данной работы являлась оценка эффективности и пролонгированного действия химической мелиорации нефелиновых песков осветленными коммунальными стоками (ОКС) для повышения биогенности (НРК-статуса) техногрунта при создании растительного покрова как способа консервации хвостохранилища. В работе применен метод фитотестирования грунта, орошаемого ОКС регионального предприятия ВКХ, на одновидовом посевном материале, рекомендованном для рекультивации нарушенных территорий северных регионов. При формировании на нефелиновых песках сеянного фитоценоза из тимофеевки луговой (*Phleum pratense* L.) подтвержден стимулирующий эффект ОКС на питательный режим грунта. После фитоекстракции (по окончании эксперимента) в нем сохраняется высокий остаточный уровень содержания основных питательных элементов (N, P, K), что свидетельствует о пролонгированном действии ОКС. Для подтверждения эффекта, полученного в лабораторных условиях, на резервном хвостохранилище АНОФ-2 в 2019 г. заложен полевой эксперимент, наблюдения продолжают. Орошение нефелиновых песков осветленными коммунальными стоками в суммарной норме 380 т/га при соблюдении условий многократного равномерного распределения поливочной воды по площади имеет пролонгированный эффект на питательный режим грунта и достаточно для создания устойчивого растительного покрова из тимофеевки луговой на отходах рудообогащения без землевания.

Ключевые слова: отходы обогащения апатит-нефелиновых руд, азот, фосфор, калий, осветленные коммунальные стоки, нетрадиционный мелиорант, лимонная кислота, подвижные формы, доступность для растений, тимофеевка луговая *Phleum pratense* L.

Введение

Активная эксплуатация месторождений полезных ископаемых Мурманской области способствовала формированию на ее территории обширных хвостохранилищ, признающихся в регионе объектами накопленного экологического ущерба [1]. Так, в Государственный реестр объектов размещения отходов (ОРО) под номером 51-00009-3-00479-010814 включено хвостохранилище апатит-нефелиновой обогатительной фабрики КФ АО «Апатит», а основным назначением ОРО обозначено захоронение. Однако результаты технологических изысканий, обобщенные в работе [2], продемонстрировали возможность получения из отходов рудообогащения КФ АО «Апатит» качественных концентратов: апатитового, нефелинового, сфенового, эгиринового и титаномagnetитового. Отсюда все существующие хвостохранилища АО «Апатит» могут рассматриваться как техногенные месторождения, потенциально пригодные для промышленной переработки в будущем, а потому подлежащие максимальному сохранению при ликвидации хвостохранилищ как гидротехнических сооружений.

Использование техногенных месторождений, полигонов отходов недропользования и восстановление нарушенных экосистем (почв, растительного покрова) являются одними из основных направлений инновационного развития недродобывающего комплекса РФ [3]. На основе концепции внедрения наилучших доступных технологий (НДТ) в области восстановления земель, нарушенных деятельностью горнопромышленных предприятий, выделено консервационное направление их рекультивации [4]. С 1964 по 1984 г. Кольским филиалом АН СССР проводилась активная наработка опыта по рекультивации и последующей консервации хвостохранилища АНОФ-1 комбината «Апатит» (близ г. Кировска). Поскольку валовой анализ нефелиновых песков свидетельствовал о благоприятных предпосылках для выращивания растений, то перспективным направлением в те годы признавалось залужение тела хвостохранилища не только для предотвращения его ветровой и водной эрозии, но и в целях создания

продуктивных сельскохозяйственных угодий на обработанной территории [5]. Результаты исследований эволюции техногенных ландшафтов законсервированных и ныне функционирующих хвостохранилищ КФ АО «Апатит», а также трансформации почв сельхозугодий, созданных на нефелиновых песках, отражены в работе [6]. Авторами выданы рекомендации по созданию устойчивого растительного покрова на нарушенных территориях в зависимости от состава песков, характера рельефа, условий увлажнения грунта. В частности, относительно направления химической мелиорации нефелиновых песков показано, что из-за высокой подвижности калия в нефелиновых песках подкормка растений калийными удобрениями не требуется. Отсутствие в хвостах органического вещества биогенного происхождения и связанного с ним азота признано причиной неизбежности ежегодного внесения азотных удобрений в рекультивируемый грунт. Фосфор в песках находится в составе остаточного апатита в формах, слабо доступных для растений, поэтому приведены доводы о невозможности развития фитоценоза без дополнительных инвестиций минеральных фосфорных удобрений. Нами сделано предположение, что одной из мер создания и поддержания устойчивости растительного покрова на хвостохранилищах может являться их поверхностное орошение стоками регионального предприятия водопроводно-канализационного хозяйства (ВКХ). Метод является разновидностью химической мелиорации, направленной прежде всего на повышение биогенности грунта. Этот параметр определяется наличием в стоках органического вещества, легкодоступного для микробиоты, а также лабильностью азота, фосфора и калия, обуславливающей их ассимиляцию растениями.

Применение муниципальных сточных вод для выращивания растений с различной целевой направленностью (заготовка и переработка кормовых и технических культур, овощеводство, садоводство) признано международной практикой эффективным и экономически целесообразным еще в прошлом столетии, что обусловлено многокомпонентным составом стоков с соотношением макро-

и микроэлементов, благоприятным для удобрительных поливов [7]. В настоящее время особый акцент делается на пригодность таких стоков для орошения как источников азота и фосфора, легкодоступных для растений [8]. Немаловажным фактором является благоприятное влияние стоков на повышение биологической активности почв/грунтов орошаемых территорий, связанное с высоким содержанием лабильных форм органического вещества, особенно микробного происхождения [9]. Следует подчеркнуть, что во всем мире уделяется пристальное внимание оценке риска применения коммунальных стоков в системах поверхностного и внутрипочвенного орошения, а также в гидропонных установках, при этом проблема экологической безопасности в большинстве стран успешно решена [10, 11]. Тем не менее, в большинстве развивающихся стран продолжается использование коммунальных стоков либо вообще без предварительной очистки, либо не полностью доведенных до санитарно-гигиенических нормативов. Согласно оценке, приведенной в [12], площадь земельных полей, орошаемых такими стоками, достигает в мире 3,5 млн га.

В последние годы существенно расширяется область применения коммунальных стоков в горной промышленности, главным образом на месторождениях сульфидных руд [13, 14]. Повышенное внимание к таким водам связано с их высокой кислотонейтрализующей и комплексообразующей способностью, и смешение с ними высокоагрессивных дренажных вод позволяет существенно снизить экологическую опасность побочных продуктов добычи в местах разработки руд цветных металлов. Патентный поиск показал, что и в отечественной практике предлагалось внедрение технологий орошения нарушенных территорий хозяйственно-бытовыми стоками [15]. При этом основным направлением признавалась активизация почвообразовательных процессов для эффективного задержания территорий, нарушенных золоотвалами и хвостохранилищами, однако широкого распространения в РФ такой способ не получил. Обзор международного опыта показал, что аналогами объектов для изучения процессов взаимодействия коммунальных

стоков с песчаными грунтами хвостохранилищ могут являться медленные песчаные фильтры (SSF – «slow sand filters»). Модернизация таких объектов для эффективного применения в третичной очистке (доочистке) как в централизованных, так и в децентрализованных системах водоотведения выходит в настоящее время на новый технологический уровень, в том числе в северных регионах [16]. Весьма широко SSF-системы начинают применяться и в современных системах сбора и очистки дождевых вод для доведения их качества до нормативов питьевого водоснабжения, в частности, по микробиологическим показателям [17].

Известно, что в силу продолжающегося применения устаревших технологий на большинстве предприятий ВКХ РФ средней мощности отсутствует стадия доочистки осветленных коммунальных стоков (ОКС) от азота и фосфора до уровня НДС, обеспечиваемого внедрением НДТ водоотведения [18]. В такой ситуации в водоприемники, зачастую являющиеся одновременно и источниками питьевого водоснабжения, сбрасываются загрязненные стоки, что повышает биогенную нагрузку на водоемы. Одним из таких предприятий ВКХ является АО «Апатитыводоканал». Сброс «проблемных» стоков КОС-3 предприятия производится в озеро Имандра – крупнейшее водохранилище Мурманской области, экосистема которого весьма уязвима к изменению ее трофического статуса [19]. При этом при сбросах, помимо загрязнения водоема, безвозвратно теряются и все ценные компоненты, остающиеся в стоках предприятия после недостаточной очистки. КОС-3 территориально примыкают к резервному хвостохранилищу КФ АО «Апатит», с 2006 г. являющегося модельным объектом для отработки методов рекультивации нефелиновых песков без землевания – на основе применения инновационных технологий и химической мелиорации с применением отходов производства и потребления [20]. Целью данной работы являлось продолжение работ по оценке эффективности химической мелиорации нефелиновых песков для повышения их биогенности и подтверждение пролонгированного мелиоративного действия ОКС на

питательный режим техногрунтов при рекультивации нарушенных территорий.

Материалы и методы

Объектом исследований являлись нефелиновые пески, отобранные на хвостохранилище АНОФ-2 АО «Апатит» в виде усредненной пробы лежалых хвостов. По гранулометрическому составу грунт относится к песчаной фракции, результаты его валового анализа приведены в работе [21]. Общее содержание калия в исходном грунте (в пересчете из оксидной формы) составляет 41 500 мг/кг, фосфора – 5 276 мг/кг. Определение общего азота в работе [21] не проводилось, но существующий пробел восполнен в данной работе.

Техногенный грунт массой 340 г помещали в пластиковые емкости слоем 3 см, на поверхность наносили семена тимфеески луговой (*Phleum pratense* L.) производства ООО «Нестор» (г. Шушары, Ленинградская область, урожай 2018 г.). Норма высева семян составляла 66 г/м². Опыт был заложен в трех вариантах: (1) – контрольный, орошение дождевой водой на протяжении всего эксперимента ($n = 5$); (2) – однократное орошение ОКС в начале эксперимента, затем – только дождевой водой ($n = 5$); (3) – орошение только ОКС в течение всего эксперимента ($n = 5$). Дождевая вода собиралась в специальную емкость до начала эксперимента. Орошение грунта и ОКС, и дождевой водой осуществлялось без их предварительной фильтрации, что предполагает наличие в них взвесей (в ОКС до 68 мг/л, табл. 1). Коммунальные стоки для орошения отбирались после первичных отстойников – на промежуточной стадии водоочистки, осуществляемой на региональных канализационных очистных сооружениях (КОС) средней мощности (26 тыс. м³ в сутки). КОС-3 расположены в промышленной зоне г. Апатиты в непосредственной близости к резервному хвостохранилищу АНОФ-2 КФ АО «Апатит». Химический состав ОКС, использованных для орошения, приведен в табл. 1. Данные производственного мониторинга указывают на высокое содержание в стоках питательных элементов (К, Са, Mg, Р, аммонийного N) в водорастворимых формах, доступных для расте-

ний. Относительно высокие значения ХПК и БПК₅ стоков позволяют предполагать инокуляцию нефелиновых песков после их орошения стоками, сопровождающуюся повышением биогенности таких техногрунтов за счет роста микробиологической активности [9]. Такое же предположение мы считаем обоснованным и в отношении дождевой воды – в связи с наличием в ней взвешенных частиц, признающимися основными источниками микробиологического загрязнения атмосферных выпадений.

Таблица 1

Химический состав ОКС*

Параметр	Ед. измерения	Значение
pH	-	7,63
Взвешенные вещества	мг/л	67,6
Сухой остаток	мг/л	290
ХПК	мгО ₂ /л	223,7
БПК ₅	мгО ₂ /л	117,7
NH ₄ ⁺	мг/л	25,74
NO ₂ ⁻	мг/л	0,14
NO ₃ ⁻	мг/л	0,30
Cl ⁻	мг/л	31,31
P-PO ₄ ³⁻	мг/л	1,83
SO ₄ ²⁻	мг/л	32,26
K	мг/л	7,50
Na	мг/л	30,0
Ca	мг/л	14,5
Mg	мг/л	3,52
Fe	мг/л	1,29

* по данным Испытательного центра качества вод АО «Апатитыводоканал», аттестат аккредитации № РОСС RU. 0001.514427.

Лабораторные опыты проводились параллельно для всех вариантов в период с 03.09 по 13.10.2018 в одинаковых условиях, общая продолжительность эксперимента – 40 дней. Последовательность орошения грунта ОКС либо дождевой водой следующая: при закладке опыта 40 мл на емкость, затем через каждые три дня по 35 мл на емкость. Суммарная норма орошения за весь период эксперимента составила 38 л/м² (380 т/га). Интенсивность освещения в период проведения эксперимента составляла в пасмурные дни 6, в солнечные – 20 кЛк, температура воздуха в поме-

щении не превышала 22–23 °С, влажность воздуха – 60 %. Дополнительная подкормка растений минеральными удобрениями в ходе эксперимента не проводилась. Результаты фенологических наблюдений, полученные в данном исследовании, приведены в работе [22], где показано, что последствием многократного поверхностного орошения нефелиновых песков ОКС явилось двукратное превышение зеленой биомассы относительно контрольного варианта (с орошением грунта дождевой водой в тех же нормах).

По окончании опытов наземная биомасса растений полностью срезалась, высушивалась до воздушно-сухого состояния и размалывалась. Далее навеска наземной части растительного материала (около 1 г) переводилась в азотнокислую вытяжку в открытой системе мокрого озоления (установка Gerhard (Germany)) с применением концентрированной HNO_3 . Содержание калия в профильтрованной вытяжке определялось методом атомно-эмиссионной спектроскопии, фосфора – фотоколориметрическим методом Лоури – Лопеса по интенсивности синей окраски восстановленного фосфорно-молибденового комплекса (восстановитель – аскорбиновая кислота). Валовое содержание азота в растительном материале определялось методом Кьельдаля после озоления навески в концентрированной серной кислоте в присутствии катализатора ($\text{K}_2\text{SO}_4 + \text{CuSO}_4$). Этот же метод использовался для определения общего азота в исходном грунте и остаточного содержания N в навеске по окончании эксперимента.

Техногрунт перед проведением анализов доводился до воздушно-сухого состояния при комнатной температуре, после чего из него тщательным образом удалялись остатки растительного материала. Анализ на остаточное содержание доступных форм К и Р проводился после просеивания грунта через сито 2 мм. Далее по аналогии с почвенными анализами готовилась вытяжка грунта с применением аммонийно-ацетатного буфера (рН = 4,65, при соотношении «грунт : буферный раствор» 1 : 10) [23]. Содержание элемента в аммонийно-ацетатной вытяжке с таким значением рН характеризует уровень его доступности для растений [24]. Содержание

калия в профильтрованной вытяжке определялось методом атомно-эмиссионной спектроскопии, фосфора – фотоколориметрическим методом Ватанабэ по интенсивности синей окраски восстановленного фосфорно-молибденового комплекса (восстановитель – аскорбиновая кислота).

Пролонгированность действия удобрительных поливов на питательный режим нефелиновых песков оценивалась путем сопоставления результатов остаточного содержания доступных форм К и Р по окончании эксперимента с их подвижностью в лимоннокислой вытяжке исходного грунта (0,01 М раствор лимонной кислоты, соотношение 1 : 10). Выбор лимонной кислоты в качестве экстрагента обусловлен ее доминированием в составе фракции органических кислот почвенных растворов под посевными культурами [25]. К навеске 25 г грунта добавлялось 250 мл 0,01 М раствора лимонной кислоты. В течение 6 часов проводилось непрерывное перемешивание смеси на магнитной мешалке ES-6120 (ЭКРОС) при температуре 20 °С, после чего полученная суспензия фильтровалась через двойной фильтр «синяя лента». Химический анализ фильтрата на содержание калия и фосфора проводился методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (Elan 9000). Результаты анализов грунта и растений выражались в мг/кг с пересчетом на абсолютно-сухую массу, для чего в отдельной навеске каждой пробы определялся коэффициент гигроскопической влажности. При обработке результатов экспериментов использовались методы описательной и сравнительной статистики (One-Way ANOVA, анализ данных в программе Microsoft Excel).

Результаты и обсуждение

1. Биогенность техногенного грунта Общий азот

Считается, что нефелиновые пески лишены органического вещества биогенного происхождения и связанного с ним азота [6]. Однако в ходе химического анализа исходного грунта нами определено низкое, но не нулевое среднее содержание ($n = 3$) в нем азота, а именно 9,77 мг/кг. Это можно объяснить остаточным

содержанием в грунте азотсодержащих фло-тоагентов и возможной азотфиксацией в поверхностном слое лежалых грунтов. Установлено, что отходы рудообогатения, выходящие с АНОФ-2, содержат как сапротрофные бактерии, использующие азот органических соединений, так и бактерии, утилизирующие минеральный азот [26]. В этой же работе отмечено возрастание численности микроорганизмов в самом технологическом процессе переработки руды, условия которого способствуют размножению бактерий. Согласно [6] техногенный грунт хвостохранилища содержит микроорганизмы (бактерии, грибы), суммарная биомасса которых достигает в среднем 37 мг/кг субстрата в свеженамытых хвостах и 56 мг/кг в лежалых отходах. В работе [27] на хвостохранилище АНОФ-2 отмечено образование поверхностной криптогамной корки, содержащей

цианопрокариоты, являющиеся основными азотфиксаторами, повышающими азотный пул складированных песков.

Следует отметить, что и без химической мелиорации с применением ОКС отмечен высокий азотный пул техногенного грунта после изъятия биомассы. Так, в контрольном варианте остаточный уровень Нобщ в грунте в 11 раз превысил исходное содержание (табл. 2), что невозможно связать только с привнесением азота в составе дождевой воды. В свою очередь, при вычислении нами массовых потоков N с учетом его изъятия зеленой биомассой выяснилось, что вынос азота растениями существенно выше его поступления с ОКС, даже с учетом возможного содержания в них органических форм азота, не принимающихся во внимание в ходе производственного мониторинга состава стоков.

Таблица 2

Остаточное содержание N, P, K в техногенном грунте по окончании эксперимента

Повторность опыта	Нобщ, мг/кг			Доступный P, мг/кг			Доступный K, мг/кг		
	(1)*	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
1	109,9	81,6	123,7	53,7	38,4	44,0	2 171,9	2 084,3	2 293,3
2	103,7	122,5	86,3	49,0	43,0	44,2	2 000,4	2 125,6	2 335,0
3	84,2	112,2	138,5	50,4	39,8	39,3	2 220,9	2 125,7	2 419,3
4	121,5	104,7	74,8	51,0	49,1	52,1	2 171,1	2 126,9	2 376,9
5	121,3	86,3	73,3	53,9	40,6	46,2	2 086,6	2 292,7	2 663,4
среднее	108,1	101,5	99,3	51,6	42,2	45,2	2 130,2	2 151,0	2 417,6
% от валового содержания	–	–	–	0,98	0,80	0,86	5,13	5,18	5,83

* здесь и далее номер в скобках соответствует номеру опыта.

Полагаем, что накопление азота в эксперименте связано не только с азотфиксирующей деятельностью микроорганизмов, присутствующих в грунте изначально и привнесенных с оросительной водой, в частности, в составе инокулированных взвесей. Вероятно, имеет место трансформация различных форм азота в пределах микробиологической пленки, формирующейся на нефелиновом субстрате, функционирующем по сути как медленный песчаный фильтр. Биогенная трансформация может как повысить, так и понизить остаточный уровень общего содержания азота. Так, многократное внесение легкодоступного органического вещества с ОКС

в варианте (3) могло стимулировать денитрификационную активность микробиоты песков, что способствовало удалению части азота из сферы реакции в молекулярной форме (N_2). Этим можно объяснить для варианта с многократным внесением ОКС самое низкое остаточное содержание общего азота в грунте при самом высоком поступлении в него соединений этого элемента (см. табл. 2). Так, в [28] отмечено, что потеря азота в гидронных системах, работающих на коммунальных стоках, за счет денитрификации признается одной из основных проблем, снижающих экономическую эффективность функционирования таких систем.

Доступные формы калия и фосфора

Высокое исходное валовое содержание калия и фосфора в нефелиновых песках обеспечило сохранение высокого уровня доступности для растений данных элементов питания и по окончании эксперимента (после изъятия зеленой биомассы) (см. табл. 2). Данные производственного мониторинга БПК₅ и ХПК коммунальных стоков (см. табл. 1), а также соотношение этих двух параметров свидетельствуют о высоком содержании в водах органического вещества, в частности, низкомолекулярных органических кислот. Эта фракция обладает высокой реакционной способностью, что способствует повышению подвижности/доступности калия и фосфора за счет их мобилизации из минеральных субстратов [25]. Однако, если с увеличением привноса органического вещества возрастает и остаточное содержание калия в грунте, то относительно доступности фосфора картина иная: максимум остаточного содержания его доступных форм отмечен после орошения дождевой водой. Возможной причиной могут являться побочные эффекты влияния ОКС на грунт, а именно ассимиляция фосфора микробиотой, формирование труднорастворимых фосфатов Са, Fe, Al за счет вытеснения указанных элементов из тонкодисперсной фракции песков, образование ассоциатов фосфат-ионов с органическим веществом, внесенным в составе ОКС. Однако следует подчеркнуть, что остаточное содержание доступных форм К и Р в техногрунте остается величинами, сопоставимыми с их содержанием в лимоннокислой вытяжке исходного грунта (табл. 3), что подтверждает пролонгированный эффект орошения на калий-фосфорный режим песков.

Таблица 3

Доступность К и Р в лимоннокислой вытяжке исходного грунта

Параметр	Валовое содержание	0,01 М раствор лимонной кислоты	
	мг/кг	мг/кг	% извлечения
К	41 500	1 020	2,26
Р	5 276	45,7	0,49

2. Листовая диагностика по окончании эксперимента

Результаты листовой диагностики показали, что в ходе эксперимента отмечено активное накопление всех основных элементов питания (азота, фосфора, калия) в наземной части растений одновидового фитоценоза (табл. 4). Высокая обеспеченность посевной культуры указанными элементами отмечена и в контрольном варианте (с орошением дождевой водой). При этом коэффициент биологического поглощения всех элементов возрастал с увеличением количества внесенного ОКС, но линейной зависимости не наблюдалось. Такой быстрый отклик растений на оросительные поливы даже в условиях контрольного опыта мы можем объяснить возможным усилением микробиологической активности при благоприятных условиях проведения эксперимента. Высокая влажность грунта, оптимальные температура и освещенность, хорошая аэрация, поступление важных элементов питания (К, Р, Са, Mg, аммонийного и нитратного азота) с дождевой водой создают такие условия. Так, согласно данным государственного мониторинга [29], средне-взвешенный химический состав осадков, выпадающих в регионе, следующий: калий – 0,6 мг/л, ион аммония – 0,2 мг/л, нитрат-ион – 0,9 мг/л, кальций – 1,2 мг/л, магний – 0,3 мг/л.

Весьма важным фактором роста доступности К и Р может являться относительно высокая кислотность (низкие значения pH) атмосферных выпадений в виде дождя, что является характерной особенностью даже условно-фоновых территорий крайнего Северо-Запада РФ [30].

По уровню накопления калия в сухой массе *Phleum pratense* L., достигнутого в данной работе в опытах с применением ОКС, можно говорить о его соответствии вариантам с торфованием нефелиновых песков и выращиванием злаков на окультуренных подзолистых почвах региона [5]. Многократное орошение грунта дождевой водой обеспечило накопление фосфора в надземной фитомассе свыше 4 000 мг/кг. Это превысило среднее содержание элемента в сухой массе *Phleum pratense* L., выращенной на нефелиновых песках АНОФ-1 (2 400 мг/кг в контроле, 2 500 мг/кг при торфованием), а также предел 3 300 мг/кг, достигнутый на окультуренных подзолистых почвах региона [5].

Таблица 4

Валовое содержание N, P, K в наземной части *Phleum pratense* L.

Повторность опыта	Нобщ, мг/кг			Робщ, мг/кг			Кобщ, мг/кг		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
1	24 625	30 869	30 030	3 577	3 713	4 587	25 133	29 985	29 220
2	24 880	28 862	28 850	4 097	4 444	5 527	30 465	28 160	32 091
3	24 942	28 581	34 804	4 591	4 178	4 490	27 070	32 158	35 656
4	26 544	26 028	28 406	3 602	4 137	4 709	22 928	22 671	30 728
5	14 479	25 559	32 285	4 371	4 793	4 558	29 169	29 464	32 612
среднее	23 094	27 980	30 875	4 048	4 253	4 774	26 953	28 488	32 061
КПБ*	–	–	–	0,77	0,81	0,90	0,65	0,69	0,77

* коэффициент биологического поглощения (КПБ) – отношение содержания элемента в наземной части растений к его валовому содержанию в исходном грунте; для азота данный параметр не определяется.

Орошение песков ОКС в максимально достигнутой норме 380 т/га способствовало повышению уровня содержания фосфора в сухой массе тимфеевки луговой до 4 800 мг/кг. Содержание фосфора в *Phleum pratense* L. во всех вариантах проведенного опыта соответствует оптимальным значениям для злаковых растений [31].

Содержание общего азота в наземной части *Phleum pratense* L. в контрольном варианте данной работы совпадает с результатами полевых экспериментов ее выращивания на хвостохранилище АНОФ-1 без принятия каких-либо мелиоративных мер [5]. В свою очередь, даже при однократном орошении нефелиновых песков коммунальными стоками накопление азота в *Phleum pratense* L. уже достигает уровня, отмеченного для данной культуры в международной практике повышения питательной ценности кормов за счет применения высоких доз минеральных удобрений, в том числе комплексных (NPK) [32]. В варианте с многократным внесением ОКС (суммарно 380 т/га) получены результаты накопления азота в сухой массе *Phleum pratense* L., соизмеримые с результатами листовой диагностики в полевых опытах на

нефелиновых песках при внесении 100 т/га навоза как традиционного мелиоранта [5].

Заключение

1. В условиях лабораторного эксперимента с имитацией поверхностного орошения грунта подтвержден стимулирующий эффект применения нетрадиционных мелиорантов (нефильтрованной дождевой воды, осветленных коммунальных стоков и их комбинации) на питательный режим рекультивируемых хвостохранилищ с преобладанием нефелиновых песков.

2. Коэффициент биологического поглощения N, P, K наземной биомассой однодидового (*Phleum pratense* L.) сеянного фитоценоза при поверхностном орошении во всех вариантах соответствует оптимальным уровням накопления, определенных для злаковых растений в вариантах с торфованием, внесением традиционных мелиорантов и комплексных минеральных удобрений.

3. По причине промывного водного режима нефелиновых песков эффект, полученный в лабораторных условиях, требует верификации в условиях полевого эксперимента.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов РФФИ № 19-05-50065 Микромир. «Комплексная оценка воздействия микрочастиц в выбросах горных и металлургических предприятий Мурманской области на экосистемы и состояние здоровья населения Арктики» и РФФИ № 18-05-60142 Арктика. «Зоны интенсивного природопользования в Российской Арктике в условиях изменения климата: природные и социальные процессы в долгосрочной перспективе».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Постановление Правительства Мурманской области от 29.03.2013 № 139-ПП/5 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/465600568>.
2. Гершенкоп А. Ш., Хохуля М. С., Мухина Т. Н. Переработка техногенного сырья Кольского полуострова // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2010. – № 1. – С. 4–8.
3. Лебедев Ю. В., Ковалев Р. Н., Олейникова Л. Н. Основные направления инновационного развития горнопромышленных комплексов // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 3. – С. 158–168.
4. ГОСТ Р 57446–2017. Наилучшие доступные технологии. Рекультивация нарушенных земель и земельных участков. Восстановление биологического разнообразия [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
5. Переверзев В. Н., Подлесная Н. И. Биологическая рекультивация промышленных отвалов на Крайнем Севере. – Апатиты : Изд-во Кольского филиала АН СССР, 1986. – 103 с.
6. Евдокимова Г. А., Переверзев В. Н., Зенкова И. В., Корнейкова М. В., Редькина В. В. Эволюция техногенных ландшафтов (на примере отходов апатитовой промышленности). – Апатиты : КНЦ РАН, 2010. – 146 с.
7. Zema D. A., Bombino G., Andiloro S., Zimbone S. M. Irrigation of energy crops with urban wastewater: effects on biomass yields, soils and heating values // *Agricultural Water Management*. – 2012. – Vol. 115. – P. 55–65. doi: 10.1016/j.agwat.2012.08.009.
8. Norton-Brandao D. J., Scherrenberg S. M., van Llier J. B. Reclamation of used urban waters for irrigation purposes. A review of treatment technologies // *Journal of Environmental Management*. – 2013. – Vol. 122. – P. 85–98. doi: 10.1016/j.jenvman.2013.03.012.
9. Kunacheva C., David C., Stuckey D. C. Analytical methods for soluble microbial products (SMP) and extracellular polymers (ECP) in wastewater treatment systems: A review // *Water Research*. – 2014. – Vol. 61. – P. 1–18. doi: 10.1016/j.watres.2014.04.044.
10. Ricart S., Rico A. M. Assessing technical and social driving factors of water reuse in agriculture: A review on risks, regulation and the yuck factor // *Agricultural Water Management*. – 2019. – Vol. 217. – P. 426–439. doi: 10.1016/j.agwat.2019.03.017.
11. Руководство по контролю и регулированию почвенного плодородия орошаемых земель / под ред. В. Н. Щедрина. – Новочеркасск : РосНИИПМ, 2017. – 137 с.
12. Jimenez B., Asano T. Acknowledge all approaches: the global outlook on reuse // *Water*. – 2004. – Vol. 21. – P. 32–37.
13. Tapia A., Cornejo-La Torre M., Santosc E. S., Aránd D., Gallardoe A. Improvement of chemical quality of percolated leachates by in situ application of aqueous organic wastes on sulfide mine tailings // *Journal of Environmental Management*. – 2019. – Vol. 244. – P. 154–160. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.05.040.
14. Smyntek P. M., Chastel J., Peer R., Anthony E., McCloskey J., Bach E., Wagner R., Bandstra J., Strosnider W. Assessment of sulphate and iron reduction rates during reactor start-up for passive anaerobic co-treatment of acid mine drainage and sewage // *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. – 2017. – Vol. 18 (1). – P. 76–84. doi: 10.1144/GEOCHEM2017-001.
15. Кордаков И. А. Способ рекультивации золоотвалов и хвостохранилищ. Авторское свидетельство [Электронный ресурс] // Бюллетень изобретений. – 1976. – № 20. – Режим доступа: <https://patents.su/2-515482-sposob-rekultivacii-zolootvalov-i-khvostokhranilishh.html>.
16. Scholz M. *Slow Filtration. Wetlands for Water Pollution Control*. – 2nd ed. – Elsevier, 2016. – P. 61–68.
17. Jenssen P. D., Krogstad T., Paruch A. M., Maehlum T., Adam K., Arias C. A., Heistad A., Jonsson L., Hellström D., Brix H., Yli-Halla M., Vråle L., Valve M. Filter bed systems treating domestic wastewater in the Nordic countries – performance and reuse of filter media // *Ecological Engineering*. – 2010. – Vol. 36 (12). – P. 1651–1659. doi: 10.1016/j.ecoleng.2010.07.004.
18. Данилович Д. А., Эпов А. Н., Канунникова М. А. Анализ данных работы очистных сооружений российских городов – основа для технологического нормирования // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. – 2015. – № 3–4. – С. 18–28.
19. Терентьева И. А., Кашулин Н. А., Денисов Д. Б. Оценка трофического статуса субарктического озера Имандра // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2017. – Т. 20, № 1/2. – С. 197–204.

20. Ivanova L. A., Gorbacheva T. T., Makarov D. V., Rummyantseva A. V. Some aspects of physicochemical and biological methods for the conservation of apatite-nepheline tailings in the Far North // *Power Technology and Engineering*. – 2019. – Vol. 53 (1). – P. 47–50. doi: 10.1007/S10749-019-01033-9.
21. Masloboev V. A., Svetlov A. V., Konina O. T., Mitrofanova G. V., Turtanov A. V., Makarov D. V. Selection of binding agents for dust prevention at tailings ponds at apatite-nepheline ore processing plants // *Journal of Mining Science*. – 2018. – Vol. 54 (2). – P. 329–338. – doi: 10.1134/S1062739118023702.
22. Лусис А. В., Горбачева Т. Т., Иванова Л. А. Применение осветленных коммунальных стоков (ОКС) и осадка сточных вод (ОСВ) в качестве мелиорантов для рекультивации отвалов отходов рудообогатения (хвостов) // *Международная научно-практическая конференция «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2019» (Севастополь, 23–26 сентября 2019 г.) / под ред. Л. И. Лукиной, Н. В. Ляминой*. – Севастополь : СевГУ, 2019. – С. 940–944.
23. Halonen O., Tulkki H., Derome J. Nutrient analysis methods. *Metsantutkimuslaitoksen tiedonantoja*. – 1983. – Vol. 121. – P. 1–28.
24. Quevauviller P. Operationally defined extraction procedures for soil and sediment analysis. I. Standardization // *Trends in Analytical Chemistry*. – 1998. – Vol. 17 (5). – P. 289–298. doi: 10.1016/S0165-9936(97)00119-2.
25. Jones D. L. Organic acids in the rhizosphere – a critical review // *Plant and Soil*. – 1998. – Vol. 205. – P. 25–44. doi: 10.1023/A:1004356007312.
26. Евдокимова Г. А., Гершенкоп А. Ш., Воронина Н. В. Микробиологические процессы в системе добычи и переработки апатит-нефелиновых руд с использованием оборотного водоснабжения. – СПб. : Наука, 2008. – 102 с.
27. Redkina V. V., Korneykova M. V., Shalygina R. R. Microorganisms of the Technogenic Landscapes: The Case of Nepheline-Containing Sands, the Murmansk Region. Processes and Phenomena on the Boundary Between Biogenic and Abiogenic Nature. – Springer, 2019. – P. 561–579. doi: 10.1007/978-3-030-21614-6_30.
28. Kuypers M. M. M., Marchant H. K., Kartul B. The microbial nitrogen-cycling network // *Nature Review Microbiology*. – 2018. – Vol. 16. – P. 263–276. doi: 10.1038/nrmicro.2018.9.
29. Семенец Е. С., Свистов П. Ф., Талаш А. С. Химический состав атмосферных осадков Российского Заполярья // *Изв. Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328, № 3. – С. 27–36.
30. Першина Н. А., Полищук А. И., Свистов П. Ф. К вопросу о закислении атмосферных осадков в Российской Арктике // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова*. – 2008. – Т. 558. – С. 211–232.
31. Haneklaus S. H., Schnug E. Phosphorus in Agriculture: 100 % Zero. – Dordrecht : Springer, 2016. – P. 95–125. doi: 10.1007/978-94-017-7612-7.
32. Bednarek W., Dresler S., Tkaczyk P. Nitrogen fractions in timothy grass (*Phleum pratense* L.) fertilized with different doses of mineral fertilizers // *Journal of Elementology*. – 2015. – Vol. 20(1). – P. 49–58. doi: 10.5601/jelem.2014.19.2.633.

Получено 06.05.2020

© Т. Т. Горбачева, Л. А. Иванова, А. В. Румянцева, В. В. Максимова, 2020

INCREASING THE BIOGENICITY OF TECHNICAL SOILS WHEN CREATING VEGETATION COVER AS A METHOD OF CONSERVATION TAILING DUMPS FOR MINING WASTE

Tamara T. Gorbacheva

Kola Science Centre of RAS, Institute of North Industrial Ecology Problems, 14a, Microdistrict Akademgorodok, Apatity, 184209, Russia, Ph. D., Leading Researcher, Industrial Ecology Laboratory, phone: (815)557-93-37, e-mail: podzol_gorby@mail.ru

Lyubov A. Ivanova

N. A. Avronin Polar-Alpine Botanical Garden-Institute, Kola Science Centre of RAS, Botanicheskiy Sad St., Kirovsk, 184256, Russia, D. Sc., Leading Researcher, e-mail: ivanova_la@inbox.ru

Anzhela V. Rumyantseva

Cherepovets State University, 5, Prospect Lunacharskogo, Cherepovets, 162600, Russia, Ph. D., Associate Professor, e-mail: a-v-rum@yandex.ru

Victoria V. Maksimova

Kola Science Centre of RAS, 14a, Microdistrict Akademgorodok, Apatity, 184209, Russia, Junior Researcher, Laboratory of Nature-Inspired Technologies and Environmental Safety of the Arctic, e-mail: fourthmax@mail.ru

The article reviews the domestic and international practice of using municipal wastewater as an unconventional chemical meliorant with a fertilizing effect on irrigation fields, in hydroponic systems, as well as overburden dumps and ore enrichment waste during reclamation activities. The object of research was ore enrichment waste ("tailings") of the apatite-nepheline factory ANOF-2 of the Apatite CF JSC with a predominance of nepheline sands in their composition. The tailing dump is included in the list of objects of accumulated environmental damage in the region, but due to its rich mineral composition, it is recognized as a man-made Deposit that is subject to conservation in order to obtain Apatite, nepheline, sphene, aegirine and titanomagnetite concentrates in the future. The purpose of this work was to evaluate the effectiveness and prolonged effect of chemical reclamation of nepheline sands by clarified municipal wastewater (CMWW) to increase the biogenicity (NPK status) of technical soil when creating vegetation cover as a method of preserving the tailings dump. The article uses the method of phytotesting of soil irrigated by the CMWW of a regional enterprise of the agricultural sector on a single-species seed material recommended for recultivation of disturbed territories in the Northern regions. During the formation of seeded phytocenosis from meadow Timothy (*Phleum pratense* L.) on nepheline sands the stimulating effect of CMWW on the soil nutrient regime was confirmed. After phytoextraction (at the end of the experiment), it retains a high residual level of the main nutrient elements (N, P, K), which indicates a prolonged effect of CMWW. To confirm the effect obtained in the laboratory, a field experiment was launched at the ANOF-2 reserve tailings storage facility in 2019, and observations are continuing. Irrigation of nepheline sands with clarified municipal wastewater at a total rate of 380 t/ha, subject to the conditions of multiple uniform distribution of irrigation water over the area, has a prolonged effect on the nutrient regime of the soil and is sufficient to create a stable vegetation cover from Timothy meadow on ore enrichment waste without land use.

Keywords: apatite-nepheline ore processing waste, nitrogen, phosphorus, potassium, clarified municipal effluents, unconventional ameliorant, citric acid, mobile forms, availability for plants, meadow Timothy *Phleum pratense* L.

REFERENCES

1. Decree of the Government of the Murmansk region No. 139-PP/5 of March 29, 2013. Retrieved from <http://docs.cntd.ru/document/465600568> [in Russian].
2. Gershenkop, A. Sh., Hohulya, M. S., & Mukhina, T. N. (2010). Technogenic raw material processing in the Kola peninsula. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN [Herald of the Kola Science Center of RAS]*, 1, 4–8 [in Russian].
3. Lebedev, Yu. V., Kovalev, R. N., & Oleynikova L. N. (2019). Main directions of innovation development mining complex. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGIT]*, 24(3), 158–168 [in Russian].
4. Standarts Russian Federation. (2017). GOST R 57446-2017. Best available technology. Reclamation of disturbed lands and land plots. Biodiversity restoration. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
5. Pereverzev, V. N., & Podlesnaya, N. I. (1986). *Biologicheskaya rekul'tivatsiya promyshlennykh otvalov na Kraynem Severe [Biological reclamation of industrial dumps in the Far North]*. Apatity: Kola branch of the USSR Academy of Sciences Publ., 103 p. [in Russian].
6. Evdokimova, G. A., Pereverzev, V. N., Zenkova, I. V., Korneikova, M. V., & Red'kina, V. V. (2010). *Evolyutsiya tekhnogennykh landshaftov (na primere otkhodov apatitovoy promyshlennosti) [Evolution of technogenic landscapes (on the example of wastes from the apatite industry)]*. Apatity: KSC RAS Publ., 146 p. [in Russian].
7. Zema, D. A., Bombino, G. S., & Andiloro, S. M. (2012). Zimbone Irrigation of energy crops with urban wastewater: effects on biomass yields, soils and heating values. *Agricultural Water Management*, 115, 55–65. doi: 10.1016/j.agwat.2012.08.009.

8. Norton-Brandao, D. J., Scherrenberg, S. M., & van Llier, J. B. (2013). Reclamation of used urban waters for irrigation purposes. A review of treatment technologies. *Journal of Environmental Management*, 122, 85–98. doi: 10.1016/j.jenvman.2013.03.012.
9. Kunacheva, C., David, C., & Stuckey, D. C. (2014). Analytical methods for soluble microbial products (SMP) and extracellular polymers (ECP) in wastewater treatment systems: A review. *Water Research*, 61, 1–18. doi: 10.1016/j.watres.2014.04.044.
10. Ricart, S., & Rico, A. M. (2019). Assessing technical and social driving factors of water reuse in agriculture: A review on risks, regulation and the yuck factor. *Agricultural Water Management*, 217, 426–439. doi: 10.1016/j.agwat.2019.03.017.
11. Schedrin, V. N. (Ed.). (2017). *Rukovodstvo po kontrolyu i regulirovaniyu pochvennogo plodorodiya oroshaemykh zemel' [Guidelines for the control and regulation of soil fertility of irrigated lands]*. Novocherkassk: RosNIIPM, 137 p. [in Russian].
12. Jimenez, B., & Asano, T. (2004). Acknowledge all approaches: the global outlook on reuse. *Water*, 21, 32–37.
13. Tapia, A., Cornejo-La Torre, M., Santosc, E. S., Aránd, D., & Gallardoe A. (2019). Improvement of chemical quality of percolated leachates by in situ application of aqueous organic wastes on sulfide mine tailings. *Journal of Environmental Management*, 244, 154–160. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.05.040.
14. Smyntek, P. M., Chastel, J., Peer, R., Anthony, E., McCloskey, J., Bach, E., Wagner, R., Bandstra, J., & Strosnider, W. (2017). Assessment of sulphate and iron reduction rates during reactor start-up for passive anaerobic co-treatment of acid mine drainage and sewage. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 18(1), 76–84. doi: 10.1144/GEOCHEM2017-001.
15. Kordakov I. A. (1976). Method of reclamation of ash dumps and tailings. Copyright certificate. *Byulleten' izobreteniy [Bulletin of Inventions]*, 20. Retrieved from <https://patents.su/2-515482-sposob-rekultivacii-zolootvalov-i-khvosokhranilishh.html> [in Russian].
16. Scholz, M. (2016). Slow Filtration. *Wetlands for Water Pollution Control* (pp. 61–68) (2nd ed.). Elsevier.
17. Jenssen, P. D., Krogstad, T., Paruch, A. M., Maehlum, T., Adam, K., Arias, C. A., Heistad, A., Jonsson, L., Hellström, D., Brix, H., Yli-Halla, M., Vråle, L., & Valve M. (2010). Filter bed systems treating domestic wastewater in the Nordic countries – performance and reuse of filter media. *Ecological Engineering*, 36(12), 1651–1659. doi: 10.1016/j.ecoleng.2010.07.004.
18. Danilovich, D. A., Epov, A. N., & Kanunnikova, M. A. (2015). Analysis of the data of the treatment facilities in Russian cities – the basis for technological regulation. *Nailuchshie dostupnye tekhnologii vodosnabzheniya i vodootvedeniya [The Best Available Water Supply and Water Disposal Technologies]*, 3–4, 18–28 [in Russian].
19. Terent'eva, I. A., Kashulin, N. A., & Denisov, D. B. (2017). Estimate of the trophic status of subarctic Imandra Lake. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Murmansk State Technical University]*, 20(1/2), 197–204 [in Russian].
20. Ivanova, L. A., Gorbacheva, T. T., Makarov, D. V., & Rumyantseva, A. V. (2019). Some aspects of physicochemical and biological methods for the conservation of apatite-nepheline tailings in the Far North. *Power Technology and Engineering*, 53(1), 47–50. doi: 10.1007/S10749-019-01033-9.
21. Masloboev, V. A., Svetlov, A. V., Konina, O. T., Mitrofanova, G. V., Turtanov, A. V., & Makarov, D. V. (2018). Selection of binding agents for dust prevention at tailings ponds at apatite–nepheline ore processing plants. *Journal of Mining Science*, 54(2), 329–338. doi: 10.1134/S1062739118023702.
22. Lusic, A. V., Gorbacheva, T. T., & Ivanova, L. A. (2019). Use of clarified municipal wastewater (OCS) and sewage sludge (WWS) as ameliorants for reclamation of ore processing waste dumps (tailings). In *Sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: Ekologicheskaya, promyshlennaya i energeticheskaya bezopasnost'–2019 [International Scientific and Practical conference: Environmental, Industrial and Energy Security–2019]* (pp. 940–944). L. I. Lukina & N. V. Lyamina (Eds.). Sevastopol: SevGU Publ. [in Russian].
23. Halonen, O., Tulkki, H., & Derome, J. (1983). Nutrient analysis methods. *Metsantutkimuslaitoksen tiedonantoja*, 121, 1–28. Retrieved from <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-0988-6>.
24. Quevauviller, P. (1998). Operationally defined extraction procedures for soil and sediment analysis. I. Standardization. *Trends in Analytical Chemistry*, 17(5), 289–298. doi: 10.1016/S0165-9936(97)00119-2.
25. Jones, D. L. (1998). Organic acids in the rhizosphere – a critical review. *Plant and Soil*, 205, 25–44. doi: 10.1023/A:1004356007312.

26. Evdokimova, G. A., Gershenkop, A. Sh., & Voronina, N. V. (2008). *Mikrobiologicheskie protsessy v sisteme dobychi i pererabotki apatit-nefelinovykh rud s ispol'zovaniem oborotnogo vodosnabzheniya* [Microbiological processes in the system of extraction and processing of apatite-nepheline ores using circulating water supply]. St. Petersburg: Nauka Publ., 102 p. [in Russian].
27. Redkina, V. V., Korneykova, M. V., & Shalygina, R. R. (2019). *Microorganisms of the Technogenic Landscapes: The Case of Nepheline-Containing Sands, the Murmansk Region. Processes and Phenomena on the Boundary Between Biogenic and Abiogenic Nature* (pp. 561–579). Springer. doi: 10.1007/978-3-030-21614-6_30.
28. Kuypers, M. M. M., Marchant, H. K., & Kartul, B. (2018). The microbial nitrogen-cycling network. *Nature Review Microbiology*, 16, 263–276. doi: 10.1038/nrmicro.2018.9.
29. Semenets, E. S., Svistov, P. F., & Talash, A. S. (2017). Chemical composition of atmospheric precipitation in Russian Subarctic. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], 328(3), 27–36 [in Russian].
30. Pershina, N. A., Polishchuk, A. I., & Svistov, P. F. (2008). On the acidification of atmospheric precipitation in the Russian Arctic. *Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A. I. Voeykova* [Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory], 558, 211–232 [in Russian].
31. Haneklaus, S. H., & Schnug, E. (2016). *Phosphorus in Agriculture: 100 % Zero* (pp. 95–125). Dordrecht: Springer. doi: 10.1007/978-94-017-7612-7.
32. Bednarek, W., Dresler, S., & Tkaczyk, P. (2015). Nitrogen fractions in timothy grass (*Phleum pratense L.*) fertilized with different doses of mineral fertilizers. *Journal of Elementology*, 20(1), 49–58. doi: 10.5601/jelem.2014.19.2.633.

Received 06.05.2020

© T. T. Gorbacheva, L. A. Ivanova, A. V. Rumyantseva, V. V. Maksimova, 2020