

МАРИНА ВЯЧЕСЛАВОВНА СЛУКОВСКАЯ
кандидат биологических наук, старший научный сотрудник
лаборатории минерального сырья и силикатного синтеза,
Институт химии и технологии редких элементов
и минерального сырья имени И. В. Тананаева Кольского
научного центра РАН (Апатиты, Российская Федерация)
krem.mv@gmail.com

ЕЛЕНА ВАЛЕНТИНОВНА НОВИЧОНОК
кандидат биологических наук, младший научный сотрудник
лаборатории физиологии и цитологии древесных рас-
тений, Институт леса Карельского научного центра РАН
(Петрозаводск, Российская Федерация)
enovichonok@inbox.ru

ИРИНА ПЕТРОВНА КРЕМЕНЕЦКАЯ
кандидат технических наук, старший научный сотрудник
лаборатории минерального сырья и силикатного синтеза,
Институт химии и технологии редких элементов и мине-
рального сырья имени И. В. Тананаева Кольского научного
центра РАН (Апатиты, Российская Федерация)
kremen@chemistry.kolasc.net.ru

ИРИНА АЛЕКСАНДРОВНА МОСЕНДЗ
аспирант лаборатории минерального сырья и силикатного
синтеза, Институт химии и технологии редких элементов
и минерального сырья имени И. В. Тананаева Кольского научного
центра РАН (Апатиты, Российская Федерация)
mosenetz@chemistry.kolasc.net.ru

СВЕТЛАНА ВИТАЛЬЕВНА ДРОГОБУЖСКАЯ
кандидат химических наук, старший научный сотрудник
лаборатории химических и оптических методов анализа,
Институт химии и технологии редких элементов и мине-
рального сырья имени И. В. Тананаева Кольского научного
центра РАН (Апатиты, Российская Федерация)
drogo_sv@chemistry.kolasc.net.ru

ЕВГЕНИЯ ФЕДОРОВНА МАРКОВСКАЯ
доктор биологических наук, профессор, заведующий ка-
федрой ботаники и физиологии растений Института био-
логии, экологии и агротехнологий, Петрозаводский госу-
дарственный университет (Петрозаводск, Российская Фе-
дерация)
volev10@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ *FESTUCA RUBRA* L. В ФИТОРЕМЕДИАЦИИ: КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕХНОГЕННОГО ГРУНТА НА РАСТЕНИЕ*

Проблема фиторемедиации территорий, подвергшихся влиянию предприятий цветной металлургии, в настоящее время является крайне актуальной. В статье приводятся результаты эксперимента по изучению влияния грунта техногенной пустоши на овсяницу красную (*Festuca rubra* L.), являющуюся металл-толерантным видом злаковых растений. Техногенный грунт был отобран возле медно-никелевого комбината (г. Мончегорск, Мурманская обл., Россия). Эксперимент включал 4 варианта грунта ($n = 6$): техногенный торф, смесь техногенного торфа с контрольным в пропорции 1:1 и 1:3, контрольный торф. Изучали такие параметры, как химический состав растений и грунта (доступные растениям формы), высота и биомасса надземных органов растений, показатели флуоресценции хлорофилла *a*, содержание фотосинтетических пигментов. Валовое содержание меди в техногенном грунте составляло 6,4 г/кг, никеля – 1,6 г/кг. Содержание доступных растениям форм элементов в вариантах грунта зависело от доли техногенного компонента и величины pH – прямо пропорционально для Cu и Ni и обратно пропорционально – для K, P, Mg, Ca. В варианте опыта с техногенным грунтом семена не проросли и всходы не появились. В остальных вариантах проективное покрытие составляло 100 %. Добавление техногенного грунта в пропорции 1:3 усиливало ростовые процессы, что приводило к повышенному накоплению биомассы и высокой активности фотосинтетического аппарата. Листья овсяницы в варианте с 50 % добавлением техногенного грунта содержали экстремально высокие концентрации никеля – 300 мг/кг и меди – 190 мг/кг. Грунт в этом варианте оказывал угнетающий эффект на активность фотосинтетического аппарата, что может быть связано с ингибированием световой фазы фотосинтеза. Полученные результаты показали, что овсяница красная

устойчива к высоким концентрациям меди и никеля в грунте, способна активно аккумулировать ТМ из грунта с мультиэлементным загрязнением и, следовательно, может успешно использоваться в технологии фиторемедиации.

Ключевые слова: фиторемедиация, овсяница красная, *Festuca rubra* L., медь, никель, флуоресценция хлорофилла *a*, фотосинтетические пигменты, макроэлементы

ВВЕДЕНИЕ

Процессы рассеяния соединений тяжелых металлов (ТМ) в природной среде привели к образованию в зонах воздействия промышленных предприятий техногенных ландшафтов, водные и почвенные объекты которых являются источниками вторичного неконтролируемого загрязнения гидросферы. В Мурманской области (Кольский полуостров, Арктическая зона РФ) одними из основных источников загрязнения экосистем являются медно-никелевые предприятия акционерного общества «Кольская горно-металлургическая компания», производственные площадки которого расположены возле городов Мончегорск и Заполярный [29]. В результате 80-летнего воздействия аэротехногенных выбросов в импактных зонах этих предприятий образовались депрессивные территории, характеризующиеся высокой кислотностью и экстремальным содержанием Cu и Ni в почве и водоемах, эродированным почвенным покровом и частичной или полной утратой растительного покрова на всех ярусах [9], [29]. Присутствие ТМ в почве в подвижной форме и/или возможный переход их в биодоступную форму несут потенциальный риск для окружающей среды на годы вперед, причем естественное восстановление представляется практически невозможным [7], [9].

Лимитирующими факторами восстановления растительного покрова на техногенных пустошах в условиях Арктики и Субарктики являются такие параметры, как высокая кислотность грунта, дефицит элементов питания (K, Ca, Mg, P, Mn), экстремальные концентрации Cu и Ni, ограниченный банк семян в почве и отсутствие подземных органов возобновления, короткий период биологической активности (май – сентябрь) и невысокие температуры лета [2], [15], [40]. В таких условиях необходимо проведение работ по ремедиации, то есть очистке территории от загрязняющих веществ и/или создание условий, препятствующих их распространению [10].

В технологиях фиторемедиации вносят мелиорант и создают на нем растительный покров (обычно состоящий из злаковых растений), способный выполнять функцию стабилизации поллютантов и являться первичным сообществом на начальном этапе восстановления экосистемы [10]. Для каждой территории сочетание этих компонентов очень индивидуально, поскольку технология фиторемедиации включает как геохимическую и фитоценотическую, так и климатическую и экономическую составляющие. С учетом описанных выше условий коллективом авторов из

Кольского научного центра РАН была разработана технология фиторемедиации техногенного грунта в Арктической зоне. Начиная с 2010 года на территории возле городов Мончегорск и Заполярный для создания мелиоративного слоя успешно апробированы различные виды отходов предприятий горнопромышленного комплекса [8], [12], [18]. При создании растительного покрова как компонента технологии фиторемедиации в составе травосмеси использовалась овсяница красная (*Festuca rubra* L.).

Известно, что овсяница красная является злаковым растением, обладающим высоким коэффициентом биологического поглощения, в частности способностью к аккумуляции меди [4], [23], [36]. Овсяница красная – металл-толерантный вид, который широко применяется для восстановления растительного покрова на загрязненных почвах [41]. Данный вид является аборигенным для территории Кольского полуострова [16] и показал высокую жизнеспособность в натурных испытаниях технологии ремедиации возле городов Мончегорск и Заполярный [5], [12]. Поэтому этот вид был выбран для проведения лабораторного эксперимента.

Наличие избыточных количеств ТМ в почве обычно приводит к изменению нормального хода физиологических процессов в растениях (в том числе фотосинтеза, водного, углеродного и минерального обмена) [25], [34], [37]. Для оценки состояния растений, растущих в условиях загрязнения почвы ТМ, является актуальным использование метода изучения флуоресценции хлорофилла *a*, который позволяет оценить воздействие на растения различных абиотических стрессовых факторов [21], [24]. Кроме этого, параметры флуоресценции хлорофилла *a* хорошо коррелируют с общим состоянием растения и могут считаться надежными индикаторами негативного воздействия стресса [20].

Поскольку основная цель работ по ремедиации – это улучшение существующих эдафических условий, то главным становится вопрос оценки совокупности факторов, являющихся лимитирующими при произрастании того или иного вида растений на данном типе техногенного грунта, как по химическим, так и по физиолого-биометрическим параметрам.

В этой связи в задачи исследования входило:

- 1) оценить влияние характеристик техногенного грунта на биометрические показатели овсяницы и состояние фотосинтетического аппарата (ФА) (показатели флуоресценции хлорофилла *a*);
- 2) выявить возможность применения овсяницы

красной в технологии фиторемедиации территорий техногенной пустоши медно-никелевого комбината.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Схема эксперимента

Оценка влияния техногенного торфа на физиологические и биометрические характеристики овсяницы красной проводилась в камеральных условиях. Эксперимент включал 4 варианта грунта: *A* – контрольный торф; *B* – смесь техногенного торфа с контролльным в пропорции 1:3, *C* – смесь в пропорции 1:1; *D* – техногенный торф.

Техногенный торф был отобран на территории Мончегорской техногенной пустоши (Россия, Мурманская область, г. Мончегорск) на расстоянии 0,7 км от источника аэротехногенного загрязнения. Торф перед посевом растений был высушен до воздушно-сухого состояния и просеян через сито 1 мм. В качестве контрольной почвы был использован грунт из смеси верховых торфов с добавлением органических субстратов и других добавок (TERRAVITA универсальный), используемый в цветоводстве. Химический состав грунта в разных вариантах эксперимента приведен в главе «Результаты».

Семена овсяницы красной одинаковой навески были высажены на слой грунта толщиной 12 см в пластиковые контейнеры. Каждый вариант выполнен в шести повторностях. Растения выращивали в условиях регулируемого освещения, фотопериод составлял 12 ч, температура – 20–22 °C. Полив проводился 1–2 раза в неделю по мере необходимости. Измерения биометрических и физиологических показателей проведены через 40 дней после высеява семян. Эксперимент проведен дважды с разницей в 2 года. Поскольку в варианте *D* семена не взошли либо проростки погибли, в результатах будут рассматриваться преимущественно варианты *A*, *B* и *C*.

Содержание химических элементов в грунте и растениях

Массовые концентрации металлов в почве определяли атомно-эмиссионным и атомно-абсорбционным методами с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра AA-7000 (Shimadzu, Япония). Пробоподготовка состояла в разложении в микроволновой системе SW4 (Berghof, Германия) в концентрированных кислотах HCl:HNO₃ (3:1). Данные были получены с использованием оборудования ЦКП «Аналитическая лаборатория» ИЛ КарНЦ РАН.

Химический анализ грунта и растений был выполнен в специализированной аккредитованной лаборатории Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья Кольского научного центра РАН (г. Апатиты, Мурманская обл.). Валовое содержание элементов в растениях и почвах определяли после автоклавного микроволнового разложения в системе SW4

в автоклавах DAK 100 (Berghof, Германия). Для разложения образцов почвы использовали смесь HF_{конц.} и HNO₃ _{конц.}, для растений – HNO₃ _{конц.} с добавлением небольшого количества H₂O₂. Массовые концентрации биодоступных форм элементов в почве определяли по стандартной процедуре с использованием аммонийно-ацетатного буферного раствора (pH 4,65) [39]. Полученные растворы анализировали с помощью масс-спектрометра с индуктивно связанный плазмой ELAN 9000 DRC-e (Perkin Elmer, США). Показатель pH определяли по стандартной процедуре на иономере И-160 М (НПО «Измерительная техника ИТ», Россия).

Биометрические показатели растений

Биометрический метод включал измерение высоты надземных органов растений и измерение биомассы надземных органов в воздушно-сухом состоянии (*n* = 210).

Флуоресценция хлорофилла *a*

Для измерений флуоресценции хлорофилла использовали флуориметр с импульсно-модулированным освещением JUNIOR-PAM (Walz, Германия). Параметры флуоресценции хлорофилла регистрировали после 30-минутной темновой адаптации. Определяли следующие параметры: начальную (F0), максимальную (Fm), переменную флуоресценцию (Fv) и максимальный фотохимический квантовый выход ФС 2 (Fv/Fm). Быстрые световые кривые (RLCs) были получены с использованием программного обеспечения WinControl. Относительную скорость транспорта электронов (ETR), эффективный фотохимический квантовый выход ФС 2 (Y (II)), коэффициенты фотохимического (qP) и нефотохимического (NPQ) тушения фиксировали при ФАР, равной 66, 90, 125, 190, 285, 420, 625 и 820 мкмоль·м⁻² с⁻¹.

Содержание фотосинтетических пигментов

Содержание фотосинтетических пигментов в надземных органах овсяницы определяли спектрофотометрически (в аналитической лаборатории Института леса КарНЦ РАН). Пигменты были экстрагированы 80 % ацетоном. Оптическую плотность измеряли на спектрофотометре СФ-2000 (ОКБ Спектр, Россия) при длине волны 663, 646 и 470 нм. Содержание Хл *a* и Хл *b* (на единицу сырой массы листьев) в экстракте было рассчитано с помощью уравнения, которое представлено в [33]. Общее содержание хлорофилла (Хл (*a+b*)) было рассчитано как сумма Хл *a* и Хл *b*.

Расчет интегральных показателей почвы и растений

В условиях загрязнения медью и никелем предложен «физико-химический» критерий [4], который был модифицирован и назван модулем токсичности [18]. Он определяется как отношение суммарного содержания меди и никеля к каль-

цию и магнию в доступных для растений формах, выраженное в мольных единицах.

Индекс биоаккумуляции рассчитан как отношение содержания элемента в надземных органах растения к его содержанию в почве [10]. В данной статье использовано содержание доступных растениям элементов в почве.

Статистический анализ

Статистическая обработка и корреляционный анализ проводили стандартными методами с использованием программного обеспечения Microsoft Excel 2016. Достоверность различия средних величин оценивали с помощью критерия Стьюдента. Для анализа данных также использовали программу STATISTICA 10 (StatSoft Inc.).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Химические свойства грунта

Техногенный и контрольный торф различались по большинству показателей и содержали 38 и 28 % углерода, зольность – 24 и 45 %, $\text{pH}_{\text{водн.}}$ – 4,31 и 6,05, pH_{KCl} – 3,86 и 4,25 соответственно. Валовое содержание элементов (г/кг) для техногенного и контрольного торфа составляло: Са – 1,9 и 14,2, Mg – 1,1 и 2,3, K – 0,2 и 3,4, Cu – 6,4 и 0,1, Ni – 1,6 и 0,06 соответственно. Таким образом, техногенный торф характеризовался экстремально высоким содержанием таких тяжелых металлов, как медь и никель, и низкими – макроэлементами. При этом содержание азота в техногенном торфе было выше – 2,2 против 0,7 % в контроле.

Увеличение доли техногенного торфа при смешивании грунтов привело к росту актуальной кислотности: в варианте A – $6,5 \pm 0,0$, в варианте B – $5,6 \pm 0,3$, в варианте C – $5,2 \pm 0,2$, в варианте D – $3,9 \pm 0,2$. При этом содержание основных поллютантов в доступной растениям форме закономерно увеличилось (рис. 1).

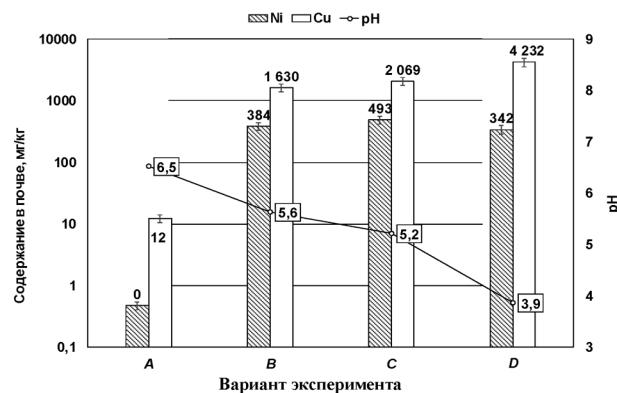


Рис. 1. Содержание меди и никеля в грунте в доступной растениям форме и актуальная кислотность грунта в различных вариантах эксперимента

Очевидно, что в данном случае действовал ряд факторов, влияющих на физико-химические свойства грунта и распределение элементов по формам миграции. В первую очередь к таким

факторам относится увеличение кислотности грунта [6]. Для проб техногенного торфяного грунта было исследовано влияние состава буферных ацетатно-аммонийных растворов в интервале pH от 3,7 до 7,8. При одинаковой валовой концентрации массовая доля доступных форм компонентов изменялась. Оказалось, что максимальные значения доступных элементов отмечались при pH 4,9 (Cu) и 4,5 (Ni), при более низких и более высоких значениях pH концентрации ТМ снижались. Таким образом, на содержание доступных форм Cu и Ni в смесях загрязненного и контрольного торфа оказывали влияние два фактора: уровень загрязнения и кислотность грунта.

Добавление техногенного торфа оказывало существенное влияние на содержание макроэлементов (рис. 2). Их содержание закономерно уменьшалось по мере увеличения в смеси доли техногенного торфа.

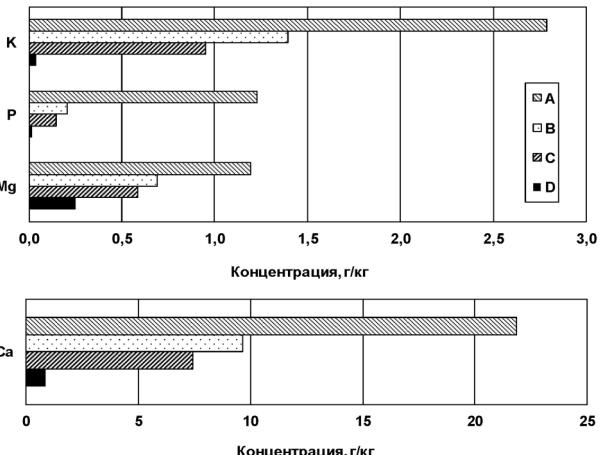


Рис. 2. Содержание макроэлементов в грунте (доступные растениям формы)

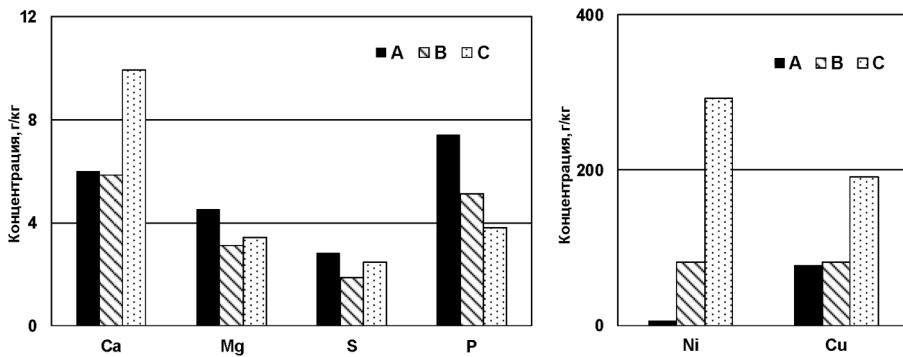
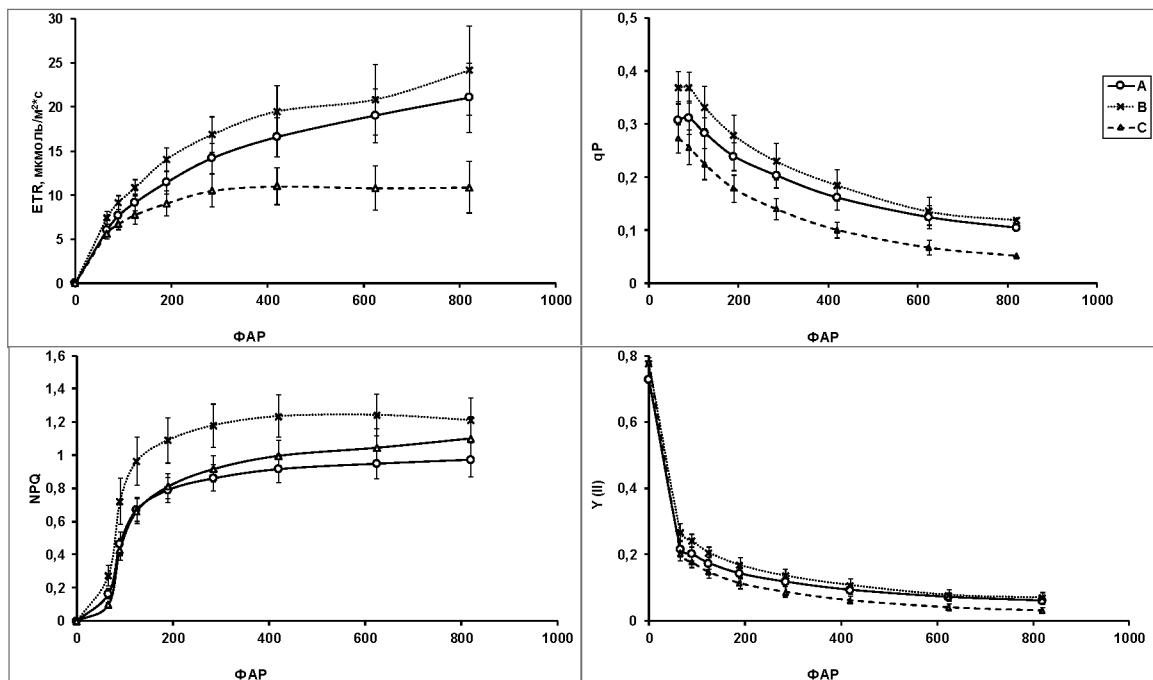
Биометрические показатели растений

Высота растений через 6 недель эксперимента в варианте B составляла $14,3 \pm 1,8$ см, что было на 31 % больше, чем в варианте A, и на 43 % больше, чем в варианте C. Биомасса надземных органов в варианте B была больше, чем в вариантах A и C, в среднем в 2,5 раза. Через 1,5 месяца после начала эксперимента у растений в вариантах A и C отмечены хлорозы в верхней части листьев.

Проективное покрытие в вариантах A, B и C составляло 100 %. В варианте D проективное покрытие через 2 недели после посева составляло 5 %, высота растений не превышала 2 см, к концу эксперимента все растения в данном варианте погибли.

Содержание химических элементов в надземных органах растений

Содержание калия в надземных органах овсяницы составляло 60, 55 и 45 г/кг в вариантах A, B и C соответственно. Содержание некоторых других химических элементов представлено на рис. 3.

Рис. 3. Содержание химических элементов в надземных органах *F. rubra*Рис. 4. Быстрые световые кривые (RLCs) у растений в различных вариантах эксперимента.
Каждая RLC обобщает 7–10 измерений RLC, значения ФАР указаны в мкмоль/м²·с

В растениях отмечается снижение содержания калия, магния и фосфора по мере увеличения доли техногенного грунта. Однако в растениях варианта *C* отмечается более высокое, по сравнению с вариантом *B*, содержание серы и магния и самое высокое из всех вариантов содержание кальция. Концентрации меди и никеля увеличиваются в ряду *A*–*B*–*C*.

Флуоресценция хлорофилла *a*

Значения F_v/F_m были сходными в вариантах эксперимента и составили $0,73 \pm 0,02$, $0,78 \pm 0,01$ и $0,78 \pm 0,01$ в вариантах *A*, *B* и *C* соответственно.

Самые высокие значения ETR отмечались для растений в варианте *B* (рис. 4). В среднем они были на 37,3 % выше, чем в варианте *C*. Снижение ETR в варианте *C* по сравнению с вариантом *A* составляло 25,8 %.

Добавление техногенного грунта привело к увеличению NPQ в среднем на 28,6 % в варианте *B* по сравнению с контролем (вариант *A*). Различия в значениях NPQ между вариантами *B* и *C* были недостоверны.

Значения qP и $Y(II)$ в варианте *B* были выше, чем в варианте *A*, относительно контроля на 13,3 и 14,0 % соответственно (см. рис. 4). Те же показатели в варианте *C* были ниже, чем в контроле, на 30,0 и 25,7 % соответственно. Таким образом, максимальные значения всех исследованных физиологических параметров отмечены в варианте *B*.

Содержание фотосинтетических пигментов

Добавление техногенного грунта привело к увеличению содержания фотосинтетических пигментов (рис. 5). В варианте *B* содержание Хл *a*, Хл *b*, Хл *a+b* и *car* относительно контро-

ля (вариант A) увеличилось на 42,7, 33,6, 40,0 и 42,8 % соответственно. Различия между вариантами A и C были отмечены только для Хл b. Его содержание увеличилось на 23,4 % относительно контроля.

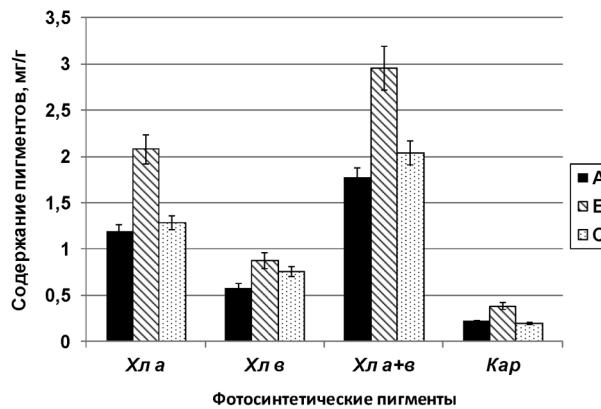


Рис. 5. Содержание фотосинтетических пигментов в листьях растений в различных вариантах эксперимента

Таким образом, содержание пигментов и показатели флуоресценции были максимальными в варианте B.

ОБСУЖДЕНИЕ

Азотно-углеродный баланс (C/N) в контролльном торфе составлял 48, что является нормой для торфа, например, Польши и Западной Сибири [1], но соответствует бедным с точки зрения обеспеченности растений макроэлементами верховым торфом [19]. Средний уровень обогащенности гумуса азотом соответствует соотношению C/N 8-11, а азотно-углеродный баланс выше 14 свидетельствует об очень низком уровне обеспеченности гумуса азотом [11]. Таким образом, техногенный торф участка Мончегорской техногенной пустоши, использованный в настоящем эксперименте, отношение C/N в котором составляло 20, имел более благоприятную характеристику с точки зрения содержания азота и углерода, чем контрольный торф. Недостаток азота в контролльном торфе, по-видимому, оказывал существенное влияние на накопление биомассы и активность фотосинтетического аппарата овсяницы красной в варианте A.

Фоновые значения pH в злаково-кустарниковом сообществе в данном регионе находились в пределах 3,81–4,71 при среднем значении 4,22 [13]. Данный вид в условиях мультиэлементного загрязнения способен произрастать в достаточно широком диапазоне pH – от 3,9 до 7,1 [42]. Таким образом, актуальная кислотность почвы, по-видимому, напрямую не оказывала негативного влияния на овсяницу в вариантах B и C.

Тем не менее опосредованное влияние повышенной кислотности грунта очевидно, поскольку она приводила к увеличению концентрации доступных для растений форм ТМ. Фитоток-

сический уровень Ni в почвах составляет 100 мг/кг, Cu – 60–125 мг/кг [28]. Грунт варианта A не являлся фитотоксичным, тогда как в вариантах B и C порог фитотоксичности был превышен соответственно по Ni в 4 и 5 раз, по Cu – в 13 и 17 раз относительно верхней границы уровня. В варианте D порог фитотоксичности превышен в 4 раза по никелю и в 34 раза по меди.

Содержание основных макроэлементов в доступной форме в торфе контроля (вариант A) было выше по сравнению с опытными вариантами. Так, по сравнению с вариантом D, Ca было больше в 25 раз, Mg – в 5 раз, Р и K – в 75 раз. Отсутствие прямой зависимости свидетельствовало о вкладе физико-химических параметров грунта в распределение элементов по формам миграции.

Среднее содержание меди в овсянице составляет 35 мг/кг [42]. В экспериментальных условиях в варианте A концентрация меди составляла 75 мг/кг, при увеличении содержания меди в почве содержание в растениях оставалось примерно на том же уровне (80 мг/кг) в варианте B и резко увеличивалось до 190 мг/кг в варианте C. Поскольку многие представители семейства Злаки относятся к растениям-исключателям, то, возможно, в варианте B у овсяницы срабатывает этот механизм защиты относительно высоких концентраций меди. В то же время в варианте B происходит существенное накопление никеля в надземных органах растений – в 13 раз относительно контроля.

Концентрации никеля и меди в варианте C относятся к токсичному уровню [6]. Высокое содержание никеля (в 50 раз выше, чем в контроле), возможно, являлось причиной снижения фотосинтетической активности в варианте C.

Существует прямая зависимость между содержанием большинства элементов в почве и растениях. Так, с увеличением доступных для растений Ni и Cu в почве при добавлении техногенного грунта увеличивается их содержание в растениях, то есть происходит их биоаккумуляция. И наоборот, с уменьшением Р и K в почвах вариантов B и C по сравнению с вариантом A уменьшается содержание этих макроэлементов в растениях. В контроле (вариант A) индекс биоаккумуляции был выше, чем в вариантах B и C, для Ni и Cu и ниже – для Р, K, Ca, Mg (рис. 6).

Несмотря на то что в надземных органах овсяницы отмечено повышение концентрации в 2–5 раз в вариантах B и C по сравнению с известными из литературы значениями [23], [42], индекс биоаккумуляции меди и никеля меньше единицы. Таким образом, данный вид злаковых может использоваться в технологиях мягкой рemedиации техногенных грунтов [10].

Результаты исследования физиологических параметров подтверждают, что данный вид растения является устойчивым к токсическому

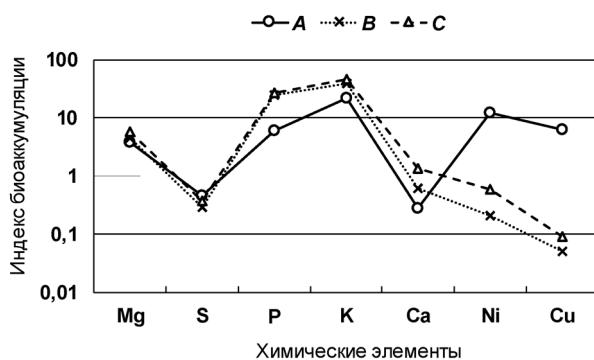


Рис. 6. Индекс биоаккумуляции в различных вариантах опыта

действию меди и никеля. У овсяницы отмечено наличие активно функционирующих систем, защищающих ФА от токсического действия ТМ, поскольку соотношение Fv/Fm сохранилось на близком к теоретическому максимуму уровне (0,8) [26], [31]. Поддержание высоких значений Fv/Fm характерно для растений, устойчивых к токсическому действию ТМ [27], [30], что показано при воздействии высокими концентрациями Ni и Cd на герань (*Pelargonium sp.*) [24].

Несмотря на общую устойчивость вида к токсическому действию ТМ, увеличение содержания ТМ в почве оказывало существенное влияние на показатели фотосинтетической активности овсяницы красной. Добавление техногенного грунта в количестве 25 % (вариант B) от общей массы почвы привело к увеличению активности ФА по сравнению с контролем. Параметр $Y(II)$ позволяет оценить фотохимическое использование энергии в ФС 2 [3]. У растений в этом варианте опыта отмечались наибольшие значения ETR , qP и $Y(II)$. В то же время добавление техногенного грунта в количестве 50 % (вариант C) привело к ингибированию активности ФА: значения показателей ETR , qP и $Y(II)$ снизились относительно контроля.

Параметр NPQ определяет нефотохимическое тушение и связан с тепловыми потерями [3]. Данные по NPQ (его сильное увеличение в варианте B) позволяют предположить, что увеличение нефотохимического тушения может служить одним из факторов, который поддерживает ФА в активном состоянии при стрессе, вызванном действием ТМ. У растений в варианте C активизации NPQ не отмечено. В литературе показано, что воздействие отдельными ТМ (Cd, Ni) в низких концентрациях может приводить к увеличению флуоресценции хлорофилла и скорости фотосинтеза [27], [32], а высокие концентрации ТМ вызывают торможение физиологических процессов [27].

Помимо активации фотосинтетических процессов, у растений варианта B отмечено увеличение содержания фотосинтетических пигментов. Из литературы известно, что обычно воздействие ТМ ингибирует биосинтез хлорофилла и каро-

тиноидов, а также включение пигментов в фотосистемы, что приводит к снижению содержания фотосинтетических пигментов [22], [38]. Однако у металл-толерантных растений может наблюдаться увеличение содержания пигментов. Так, например, у *Silene compacta* в ответ на избыток меди наблюдалось увеличение содержания хлорофилла [35].

Увеличение содержания фотосинтетических пигментов и активация фотохимических процессов при добавлении техногенного грунта в варианте B привели к увеличению биомассы растений. Исследователи отмечают, что низкое или умеренное добавление ТМ может способствовать увеличению высоты и биомассы растений, особенно у растений – гипераккумуляторов металлов, однако причина этого феномена остается не до конца понятной [35]. Одно из возможных последствий активации фотохимических процессов и увеличения биомассы – снижение концентрации ТМ на единицу массы растения. Возможно, это является одним из механизмов, позволяющих растениям преодолевать стресс, вызванный наличием большого количества ТМ в почве.

Из полученных результатов видно, что добавление техногенного грунта в соотношении техногенного и контрольного грунта, равном 1:3, не оказывало выраженного токсического действия на развитие овсяницы красной в условиях вегетационного эксперимента, а наоборот, стимулировало рост надземных органов овсяницы. Подобный эффект наблюдался в опыте с луком репчатым [14], показывающем, что всхожесть семян резко возрастила в растворах с небольшой концентрацией никеля – 0,5–1,0 мг/л. Авторы данной работы объяснили полученные результаты тем фактом, что никель является биологически активным элементом, он включен, например, в активный центр фермента уреазы [17].

Отсутствие токсического влияния на растения техногенного грунта в варианте B может быть связано с антагонистическим действием ТМ. Так, например, при добавлении техногенного грунта в растениях увеличилось содержание железа. Как было показано ранее, этот элемент значительно уменьшает токсическое действие различных ТМ, в том числе меди и никеля [27]. Кроме того, медь может снижать токсичность никеля.

Важной задачей при исследовании влияния мультиэлементного загрязнения на фитотоксичность почв является интегральная оценка техногенного грунта с точки зрения его влияния на растения. Модуль токсичности, применяемый нами для оценки свойств техногенного грунта, составлял 0,003 для варианта A, 0,009 для варианта B, 0,02 для варианта C и 2,24 для варианта D. Ранее в полевых условиях по результатам многолетнего мониторинга было выявлено, что соотношение меди и никеля к кальцию и магнию, при котором модуль токсичности составляет

0,10–0,17, приводит к угнетенному состоянию фитоценозов [12]. Таким образом, грунт варианта *C* являлся потенциально токсичным для растений, а грунт варианта *D* – сильно токсичным.

Установление предельно допустимого модуля токсичности на уровне 0,01, при котором не происходит ингибирование процессов роста и фотосинтеза, является важным с точки зрения проводимой в настоящее время работы по подбору оптимальных по химическому составу горнопромышленных отходов для использования в технологии фиторемедиации, адаптированной для условий мультиэлементного загрязнения в Мурманской области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что техногенный торфяной грунт вблизи медно-никелевого предприятия являлся токсичным для злакового растения, поскольку препятствовал процессам прорастания семян и развития проростков. Это связано с присутствием меди и никеля в экстремальных концентрациях, высокой кислотностью, а также низким содержанием макроэлементов в техногенном грунте.

Добавление техногенного торфа к контролльному в соотношении 1:3 по массе усиливало ростовые процессы, что приводило к повышенному накоплению биомассы и высокой активности фотосинтетического аппарата. Такой состав грунта стимулировал аккумуляцию никеля надземными органами растений. Модуль токсичности, равный 0,01, может считаться предельно допустимым с точки зрения нормального функционирования растений.

Грунт, 50 % которого составлял техногенный торф, оказывал угнетающий эффект на активность фотосинтетического аппарата, что может быть связано с ингибицией световой фазы фотосинтеза. При этом отмечено нарастание процесса аккумуляции ТМ. Таким образом, увеличение модуля токсичности до 0,02 приводило к негативной реакции растений на высокое содержание ТМ.

Полученные результаты показали, что овсяница красная способна в некоторых количествах накапливать медь и никель, тем самым препятствуя их миграции в экосистемах. Выявлен предельно допустимый уровень соотношения между концентрациями меди и никеля к кальцию и магнию (модуль токсичности, равный 0,01), превышение которого приводит к угнетению развития овсяницы красной.

Поскольку Арктическая зона РФ имеет крайне ограниченный запас земельных ресурсов, для ремедиации таких территорий, как техногенные пустоши в Мурманской области, целесообразно использовать отходы горнoperерабатывающей промышленности, хорошо развитой в данном регионе. В связи с изложенными свойствами овсяница красная может быть рекомендована к использованию в качестве фитостабилизатора в технологии мягкой ремедиации на данной территории.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам аналитической лаборатории Института леса Карельского научного центра РАН.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант мол_а_дк_16-35-60022/16, и Президиума РАН, программа «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биеньковски П., Титлянова А., Диттвальд Э., Шибарева С. Изменение элементного состава фитомассы сфагновых мхов в процессе торфообразования // Вестник ТГПУ. 2008. Вып. 4 (78). С. 30–34.
2. Ганичева С. Н., Лукина Н. В., Костина В. А., Никонов В. В. Техногенная дигressия и восстановительная сукцессия в хвойных лесах Кольского полуострова // Лесоведение. 2004. № 3. С. 57–67.
3. Гольцев В. Н., Каладжи М. Х., Кузманова М. А., Аллахвердиев С. И. Переменная и замедленная флуоресценция хлорофилла *a* – теоретические основы и практическое приложение в исследовании растений. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2014. 220 с.
4. Евдокимова Г. А. Эколо-микробиологические основы охраны почв Крайнего Севера. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1995. 272 с.
5. Иванова Л. А., Горбачева Т. Т., Слуковская М. В., Кременецкая И. П., Иноземцева Е. С. Инновационные технологии рекультивации нарушенных земель // Экология производства. 2014. № 2. С. 58–68.
6. Кабата-Пендас А., Пендас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
7. Калабин Г. В., Евдокимова Г. А., Горный В. И. Оценка динамики растительного покрова нарушенных территорий в процессе снижения воздействия комбината «Североникель» на окружающую среду // Горный журнал. 2010. № 11. С. 74–77.
8. Калинников В. Т., Кременецкая И. П., Иванова Л. А., Слуковская М. В., Горбачева Т. Т., Алексеева С. А., Лашук В. В., Дробобужская С. В. Приемы аддитивных технологий при создании культурфиценозов в условиях техногенных ландшафтов Субарктики, загрязненных тяжелыми металлами // Вестник КНЦ. 2014. № 2. С. 80–90.
9. Кашилина Г. М., Переображен В. Н., Литвинова Т. И. Трансформация органического вещества почв в условиях экстремального загрязнения выбросами комбината «Североникель» // Почвоведение. 2010. № 10. С. 1265–1275.
10. Копчик Г. Н. Проблемы и перспективы фиторемедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (обзор литературы) // Почвоведение. 2014. № 9. С. 1113–1130.

11. Лаврентьева И. Н., Убугунов Л. Л., Убугунова В. И. Органическое вещество: экологические особенности образования и плодородие почв: Учебное пособие. ФГОУ ВПО «Бурятская ГСХА им. В. Р. Филиппова»; Ин-т общ. и эксперим. биол. СО РАН. Улан-Удэ: Изд-во БГСХА им. В. Р. Филиппова, 2008. 229 с.
12. Лашук В. В., Слуковская М. В., Кременецкая И. П., Мосендз И. А., Иванова Л. А. Применение отходов АО «Ковдорский ГОК» для мелиорации загрязненного почвенного слоя // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18. № 2 (3). С. 746–751.
13. Лукина Н. В., Никонов В. В. Питательный режим лесов северной тайги: природные и техногенные аспекты. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 1998. 316 с.
14. Мосендз И. А., Петровова Д. А., Дробогузская С. В., Кременецкая И. П. Оценка изменения биологической эффективности растворов никеля в присутствии магния с использованием растительных тест-объектов // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18. № 2 (2). С. 448–451.
15. Никонов В. В., Лукина Н. В. Биохимические функции лесов на северном пределе распространения. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 1994. 315 с.
16. Раменская М. Л., Андреева В. Н. Определитель высших растений Мурманской области и Карелии. Л.: Наука, 1982. 435 с.
17. Серегин И. В., Кожевникова А. Д. Физиологическая роль никеля и его токсическое действие на высшие растения // Физиология растений. 2006. Т. 53. № 2. С. 285–308.
18. Слуковская М. В., Иванова Л. А., Грабачева Т. Т., Дробогузская С. В., Иноземцева Е. С., Марковская Е. Ф. Изменение свойств техногенно загрязненного грунта при использовании карбонатитового мелиоранта в зоне воздействия медно-никелевого комбината // Труды КарНЦ РАН. 2014. № 6. С. 133–142.
19. Ягодин Б. А., Жуков Ю. П., Кобзаренко В. И. Агрохимия / Под ред. Б. А. Ягодина. М.: Колос, 2002. 584 с.
20. Baker N. R., Rosengqvist E. Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities // J. Exp. Bot. 2004. Vol. 55. P. 1607–1621.
21. Beccerril J. M., Muñoz-Rueda A., Aparicio-Tejo P. and Gonzales-Murua C. The effects of cadmium and lead on photosynthesis electron transport in clover and lucern // Plant Physiol. Biochem. 1988. Vol. 26 (3). P. 357–363.
22. Caspi V., Dropka M., Horvath G., Malkin S., Marder J. B. and Raskin V. I. The effect of copper on chlorophyll organization during greening of barley leaves // Photosynth. Res. 1999. Vol. 62. P. 165–174.
23. Cuske M., Karczewska A., Gałka B., Drądračh A. Some adverse effects of soil amendment with organic materials – the case of soils polluted by copper industry phytostabilized with red fescue // Int. J. Phytorem. 2016. Vol. 18 (8). P. 846–853.
24. Dan T., Krishna R. S., Saxena P. K. Metal tolerance of scented geranium (*Pelargonium* sp. ‘Frensham’): effects of cadmium and nickel on chlorophyll fluorescence kinetics // International Journal of Phytoremediation. 2000. Vol. 2. Issue 1. P. 91–104.
25. Ernst W. H. O., Verkleij J. A. C., Schat H. Metal tolerance in plants // Acta Bot. Neerl. 1992. Vol. 41. P. 229–248.
26. He J. Y., Ren Y. F., Zhu C., Yan Y. P., Jiang D. A. Effect of Cd on growth, photosynthetic gas exchange, and chlorophyll fluorescence of wild and Cd-sensitive mutant rice // Photosynthetica. 2008. Vol. 46. P. 466–470.
27. Joshi M. K., Mohanty Pr. Chlorophyll a fluorescence as a probe of heavy metal ion toxicity in plants // G. C. Papageorgiou, Govindjee, eds. Chlorophyll a fluorescence: a signature of photosynthesis. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2004. P. 637–661.
28. Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants. CRC Press, Boca Raton, FL, 1992. 548 p.
29. Kozlov M. V., Zvereva E. L. Industrial barrens: extreme habitats created by non-ferrous metallurgy // Rev. Environ. Sci. Biotechnol. 2007. № 6. P. 231–259.
30. Krupa Z., Sielecka A., MakSYMiec W., Baszynski T. In vivo response of photosynthetic apparatus of *Phaseolus vulgaris* L. to nickel toxicity // J. Plant Physiol. 1993. Vol. 142. P. 664–668.
31. Lanaras T., Moustakas M., Symeonidis L., Diamantoglou S., Karataglis S. Plant metal content, growth responses and some photosynthesis measurements on field cultivated wheat growing on bodies enriched in Cu // Physiol. Plant. 1993. Vol. 88. P. 307–314.
32. Li S., Yang W., Yang T., Chen Y., Ni W. Effects of cadmium stress on leaf chlorophyll fluorescence and photosynthesis of *Elsholtziaargyi* – a cadmium accumulating plant // International Journal of Phytoremediation. 2015. Vol. 17. P. 85–92.
33. Lichtenthaler H. K. Chlorophyll and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes // Method Enzymol. 1987. Vol. 148. P. 350–382.
34. Malik D., Sheoran S., Singh R. Carbon metabolism in leaves of cadmium treated wheat seedlings // Plant Physiol. Biochem. 1992. Vol. 30. P. 223–229.
35. Ouzounidou G., Eleftheriou E. P., Karataglis S. Ecophysiological and ultrastructural effects of copper in *Thlaspi ochroleucum* (Cruciferae) // Can. J. Bot. 1992. Vol. 70. P. 947–957.
36. Padmavathiamma and Li. Effect of amendments on phytoavailability and fractionation of copper and zinc in a contaminated soil // International Journal of Phytoremediation. 2010. Vol. 12. P. 697–715.
37. Rubio M. I., Escrig I., Martinez-Cortina C., Lopez-Bennett F. J., Sanz A. Cadmium and nickel accumulation in rice plants. Effect on mineral nutrition and possible interactions of ABA and GA // Plant Growth Reg. 1994. Vol. 14. P. 151–157.
38. Stobart A. K., Griffiths W. F., Bukhari I. A., and Sherwood R. P. The effect of Cd on the biosynthesis of chlorophyll in leaves of barley // Plant Physiol. 1985. Vol. 63. P. 293–298.
39. Ure A. M. Single extraction schemes for soil analysis and related applications // Science of the Total Environment. 1996. Vol. 178. P. 3–10.
40. Van Grunsven J., Van Assche F., Clusters H. Reclamation of bare industrial area contaminated by non-ferrous metals: in situ metal immobilization and revegetation // Environmental Pollution. 1995. Vol. 87. P. 51–59.
41. Van Grunsven J., Cunningham S. C. Metal-contaminated soils: in situ inactivation and phytoremediation. Heidelberg; Berlin: Springer-Verlag, 1998. 265 p.
42. Wong M. H. Metal cotolerance to copper, lead, and zinc in *Festuca rubra* // Environmental research. 1982. Vol. 29. P. 42–47.

Slukovskaya M. V., I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials, Kola Science Center RAS (Apatity, Russian Federation)

Novichonok E. V., Institute of Forest of Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

Kremenetskaya I. P., I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials, Kola Science Center RAS (Apatity, Russian Federation)

Mosendz I. A., I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials, Kola Science Center RAS (Apatity, Russian Federation)

Drogobuzhskaya S. V., I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials, Kola Science Center RAS (Apatity, Russian Federation)

Markovskaya E. F., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

APPLICATION OF FESTUCA RUBRA L. IN PHYTOREMEDIATION: COMPLEX EVALUATION OF THE TECHNOGENIC SOIL EFFECT ON THE PLANT

The problem of phytoremediation of territories exposed to the influence of non-ferrous metallurgy enterprises is currently extremely hot. Results of the study reflecting the influence of the soil of technogenic wasteland on selected parameters of the red fescue (*Festuca rubra* L.), which is a metal-tolerant species of cereals, are presented in the article. The samples of technogenic soils were taken near the copper-nickel combine (Monchegorsk, Murmansk region, Russia). The experiment consisted of 4 series, where the red fescue was grown on such substrates as technogenic soils, a mixture of the soils with control peat in the ratio 1:1 and 1:3, and control peat. The studied parameters included: the chemical composition of plants and soils (forms available to plants), the height and the weight of plants, the fluorescence of chlorophyll a, the content of photosynthetic pigments. The total copper content in the technogenic soil was 6,4 g/kg, nickel 1,6 g/kg. This peat was highly toxic. The plants did not sprout in such conditions. The content of elements in the soil in other series of experiments depended on the concentration of technogenic components and the pH value-directly proportional to Cu, Ni and other heavy metals and was inverse proportional for K, P, Mg, Ca. Fescue leaves in the series with 50 % addition of the technogenic soil contained heavy metals in extremely high concentrations – 300 mg/kg for nickel and 190 mg/kg for copper. The addition of the anthropogenic soil in the ratio 1:3 strengthened the growth processes, which led to an increased accumulation of the biomass and a rather high activity of photosynthetic apparatus. The soil mixture, 50 % of which was technogenic peat, had an inhibitory effect on the accumulation of the biomass and the activity of the photosynthetic apparatus, which may be explained by the inhibition of the light phase of photosynthesis. The obtained results showed that the red fescue is capable of active accumulation of heavy metals from a substrate with a multi-element contamination and in connection with this it can be used for cleaning soils of copper-nickel enterprises. This species is resistant to the action of heavy metals and, therefore, can be successfully used for phytoremediation purposes.

Key words: phytoremediation, red fescue, *Festuca rubra* L., copper, nickel, fluorescence of chlorophyll a, photosynthetic pigments, macroelements

REFERENCES

1. Bienskovski P., Titlyanova A., Dittwald E., Shibaeva S. Change in the elemental composition of phytomass of sphagnum mosses in the process of peat formation [Izmenenie elementnogo sostava fitomassy sfagnovykh mkhov v protsesse torfoobrazovaniya]. *Vestnik TGPU*. 2008. Issue 4 (78). P. 30–34.
2. Ganicheva S. N., Lukina N. V., Kosmina V. A., Nikonorov V. V. Technogenous digression and restorative succession in the coniferous forests of the Kola Peninsula [Tekhnogennaya digressiya i vosstanovitel'naya suktsessiya v khvoynykh lesakh Kol'skogo poluostrova]. *Lesovedeniye* [Russian Journal of Forest Science]. 2004. № 3. P. 57–67.
3. Goltsev V. N., Kalajii M. H., Kouzmanova M. A., Aliakhverdiev S. I. *Peremennaya i zamedlennaya fluorescenciya khlorofilla a – teoreticheskie osnovy i prakticheskoe prilozhenie v issledovanii rasteniy* [Variable and delayed chlorophyll a fluorescence – basics and application in plant science]. Moscow, Izhevsk, Institut kom'yuternykh issledovanii Publ., 2014. 220 p.
4. Evdokimova G. A. *Ekologo-mikrobiologicheskie osnovy okhrany pochv Kraynego Severa* [Ecological and microbiological basis of protection of soils of the Far North]. Apatity, Izd-vo KNTS RAN, 1995. 272 p.
5. Ivanova L. A., Gorbacheva T. T., Slukovskaya M. V., Kremenetskaya I. P., Inozemtseva Ye. S. Innovative technologies for reclamation of disturbed lands [Innovatsionnye tekhnologii rekul'tivatsii narushennykh zemel']. *Ekologiya proizvodstva*. 2014. № 2. P. 58–68.
6. Kabata-Pendias A., Pendias X. *Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh* [Microelements in soils and plants]. Moscow, Mir Publ., 1989. 439 p.
7. Kalabin G. V., Yevdokimova G. A., Gor'nyy V. I. Assessment of vegetation cover dynamics in disturbed areas in the process of reducing the impact of the Severonickel Combine on the environment [Otsenka dinamiki rastitel'nogo pokrova narushennykh territoriy v protsesse snizheniya vozdeystviya kombinata "Severonikel" na okruzhayushchuyu sredu]. *Gornyy zhurnal* [Mining Journal]. 2010. № 11. P. 74–77.
8. Kalinnikov V. T., Kremenetskaya I. P., Ivanova L. A., Slukovskaya M. V., Gorbacheva T. T., Alekseyeva S. A., Lashchuk V. V., Drogobuzhskaya S. V. Methods of adaptive technologies in the creation of cultivated plants in the conditions of man-made landscapes of the Subarctic contaminated by heavy metals [Priemy adaptivnykh tekhnologiy pri sozdaniyu kul'turitotsenozov v usloviyah tekhnogennykh landshaftov Subarktiki, zagryaznennykh tyazhelyimi metallami]. *Vestnik KNTs*. 2014. № 2. P. 80–90.
9. Kashulina G. M., Pererzhev V. N., Litvinova T. I. Transformation of the organic matter of soils under conditions of extreme pollution by emissions from "Severonickel" Factory [Transformatsiya organicheskogo veshchestva pochv v usloviyah ekstremal'nogo zagryazneniya vybrosami kombinata "Severonikel"]. *Pochvovedeniye* [Eurasian Soil Science]. 2010. № 10. P. 1265–1275.
10. Kopitsik G. N. Problems and prospects of phytoremediation of soils contaminated by heavy metals (literature review) [Problemy i perspektivy fitoremediatsii pochv, zagryaznennykh tyazhelyimi metallami (obzor literatury)]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science]. 2014. № 9. P. 1113–1130.

11. Lavrentieva I. N., Ubugunov L. L., Ubugunova V. I. *Organicheskoe veshchestvo: ekologicheskie osobennosti obrazovaniya i plodorodiye pochv* [Organic matter: ecological features of education and soil fertility]. Ulan-Ude, Izd-vo BG-SKHA im. V. R. Filippova, 2008. 229 p.
12. Lashchuk V. V., Slukovskaya M. V., Kremenskaya I. P., Mosendz I. A., Ivanova L. A. Application of waste from JSC "Kovdorsky GOK" for reclamation of contaminated soil layer [Primenenie otkhodov AO "Kovdorskiy GOK" dlya melioratsii zagryaznenного почвенного слоя]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2016. Vol. 18. № 2 (3). P. 746–751.
13. Lukina N. V., Nikonov V. V. Nutritious regime of northern taiga forests: natural and technogenic aspects [Rezhim lesov severnoy taygi: prirodnye i tekhnogennye aspekty]. Apatity, Izd-vo Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN, 1998. 316 p.
14. Mosendz I. A., Petrasheva D. A., Drogozbushskaya S. V., Kremenskaya I. P. Evaluation of the change in the biological efficiency of nickel solutions in the presence of magnesium using plant test objects [Otsenka izmeneniya biologicheskoy effektivnosti rastvorov nikelya v prisutstvii magniya s ispol'zovaniem rastitel'nykh test-ob'ektov]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2016. Vol. 18. № 2 (2). P. 448–451.
15. Nikonov V. V., Lukina N. V. *Biogeokhimicheskie funktsii lesov na severnom predele rasprostraneniya* [Biogeochemical functions of forests at the northern limit of distribution]. Apatity, Izd-vo Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. 1994. 315 p.
16. Ramenskaya M. L., Andreyeva V. N. *Opredelitel' vysshikh rasteniy Murmanskoy oblasti i Karelii* [The guide of higher plants in the Murmansk region and Karelia]. Leningrad, Nauka Publ., 1982. 435 c.
17. Seregin I. V., Kozhevnikova A. D. The physiological role of nickel and its toxic effect on higher plants [Fiziologicheskaya rol' nikelya i ego toksicheskoe deystvie na vysshiye rasteniya]. *Fiziologiya rasteniy* [Russian Journal of Plant Physiology]. 2006. Vol. 53. № 2. P. 285–292.
18. Slukovskaya M. V., Ivanova L. A., Gorbacheva T. T., Drogozbushskaya S. V., Inozemtseva Ye. S., Markovskaya Ye. F. Change in the properties of technogenically polluted soil using carbonatite meliorant in the zone of copper-nickel plant impact [Izmenenie svoystv tekhnogenno zagryaznenного grunta pri ispol'zovanii karbonatitovogo melioranta v zone vozdeystviya medno-nikelevogo kombinata]. *Trudy KarNTs RAN*. 2014. № 6. P. 133–142.
19. Yagodin B. A., Zhukov Yu. P., Kobzarenko V. I. *Agrokhimiya* [Agrochemistry]. Ed. B. A. Yagodin. Moscow, Kolos Publ., 2002. 584 p.
20. Baker N. R., Rosenqvist E. Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities // *J. Exp. Bot.* 2004. Vol. 55. P. 1607–1621.
21. Becerril J. M., Munoz-Rueda A., Aracicio-Tejo P. and Gonzales-Murua C. The effects of cadmium and lead on photosynthesis electron transport in clover and lucern // *Plant Physiol. Biochem.* 1988. Vol. 26 (3). P. 357–363.
22. Caspi V., Drappa M., Horvath G., Malkin S., Marder J. B. and Raskin V. I. The effect of copper on chlorophyll organization during greening of barley leaves // *Photosynth. Res.* 1999. Vol. 62. P. 165–174.
23. Cuske M., Karczewska A., Galka B., Dradach A. Some adverse effects of soil amendment with organic materials – the case of soils polluted by copper industry phytostabilized with red fescue // *Int. J. Phytorem.* 2016. Vol. 18 (8). P. 846–853.
24. Dan T., Krishna R. S., Saxena P. K. Metal tolerance of scented geranium (*Pelargonium* sp. 'Frensham'): effects of cadmium and nickel on chlorophyll fluorescence kinetics // *International Journal of Phytoremediation*. 2000. Vol. 2. Issue 1. P. 91–104.
25. Ernst W. H. O., Verkleij J. A. C., Schat H. Metal tolerance in plants // *Acta Bot. Neerl.* 1992. Vol. 41. P. 229–248.
26. He J. Y., Ren Y. F., Zhu C., Yan Y. P., Jiang D. A. Effect of Cd on growth, photosynthetic gas exchange, and chlorophyll fluorescence of wild and Cd-sensitive mutant rice // *Photosynthetica*. 2008. Vol. 46. P. 466–470.
27. Joshi M. K., Mohanty Pr. Chlorophyll a fluorescence as a probe of heavy metal ion toxicity in plants // G. C. Papageorgiou, Govindjee, eds. *Chlorophyll a fluorescence: a signature of photosynthesis*. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2004. P. 637–661.
28. Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants. CRC Press, Boca Raton, FL, 1992. 548 p.
29. Kozlov M. V., Zvereva E. L. Industrial barrens: extreme habitats created by non-ferrous metallurgy // *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 2007. № 6. P. 231–259.
30. Krupa Z., Siedlecka A., Maksymiec W., Baszyński T. In vivo response of photosynthetic apparatus of *Phaseolus vulgaris* L. to nickel toxicity // *J. Plant Physiol.* 1993. Vol. 142. P. 664–668.
31. Lanaras T., Moustakas M., Symeonidis L., Diamantoglou S., Karatagli S. Plant metal content, growth responses and some photosynthesis measurements on field cultivated wheat growing on bodies enriched in Cu // *Physiol. Plant.* 1993. Vol. 88. P. 307–314.
32. Li S., Yang W., Yang T., Chen Y., Ni W. Effects of cadmium stress on leaf chlorophyll fluorescence and photosynthesis of *Elsholtzia argyi* – a cadmium accumulating plant // *International Journal of Phytoremediation*. 2015. Vol. 17. P. 85–92.
33. Lichtenhaler H. K. Chlorophyll and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes // *Method Enzymol.* 1987. Vol. 148. P. 350–382.
34. Malik D., Sheoran S., Singh R. Carbon metabolism in leaves of cadmium treated wheat seedlings // *Plant Physiol. Biochem.* 1992. Vol. 30. P. 223–229.
35. Ouzounidou G., Eleftheriou E. P., Karatagli S. Ecophysiological and ultrastructural effects of copper in *Thlaspi ochroleucum* (Cruciferae) // *Can. J. Bot.* 1992. Vol. 70. P. 947–957.
36. Padmanabha and Li. Effect of amendments on phytoavailability and fractionation of copper and zinc in a contaminated soil // *International Journal of Phytoremediation*. 2010. Vol. 12. P. 697–715.
37. Rubio M. I., Escrig I., Martinez-Cortina C., Lopez-Bennett F. J., Sanz A. Cadmium and nickel accumulation in rice plants. Effect on mineral nutrition and possible interactions of ABA and GA // *Plant Growth Reg.* 1994. Vol. 14. P. 151–157.
38. Stobart A. K., Griffiths W. F., Bukhari I. A., and Sherwood R. P. The effect of Cd on the biosynthesis of chlorophyll in leaves of barley // *Plant Physiol.* 1985. Vol. 63. P. 293–298.
39. Ure A. M. Single extraction schemes for soil analysis and related applications // *Science of the Total Environment*. 1996. Vol. 178. P. 3–10.
40. Vangronsveld J., Van Assche F., Clusters H. Reclamation of bare industrial area contaminated by non-ferrous metals: in situ metal immobilization and revegetation // *Environmental Pollution*. 1995. Vol. 87. P. 51–59.
41. Vangronsveld J., Cunningham S. C. Metal-contaminated soils: in situ inactivation and phytoremediation. Heidelberg; Berlin: Springer-Verlag, 1998. 265 p.
42. Wong M. H. Metal cotolerance to copper, lead, and zinc in *Festuca rubra* // *Environmental research*. 1982. Vol. 29. P. 42–47.