

РЕМЕДИАЦИЯ АРКТИЧЕСКИХ ТЕХНОГЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

Калинников В.Т.¹, Кременецкая И.П.¹, Иванова Л.А.², Горбачева Т.Т.³,
Федосеева В.И.⁴, Слуковская М.В.⁵, Дрогобужская С.В.¹, Алексеева С.А.⁶

¹*Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья
им. И.В. Тананаева КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия*

²*Полярно-альпийский ботанический сад-институт
им. Н.А. Аврорина КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия*

³*Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия*

⁴*Институт мерзлотоведения СО РАН, г. Якутск, Россия*

⁵*Петрозаводский государственный университет, г. Петрозаводск, Россия*

⁶*Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия
kremen@chemy.kolasc.net.ru*

Введение

Промышленное освоение арктического региона сопровождается появлением в местах размещения предприятий цветной металлургии так называемых техногенных пустошей – крайнего проявления дигрессионной сукцессии растительных сообществ в результате воздействия аэротехногенных выбросов [1, 2]. В настоящее время отсутствуют юридические основания для присвоения таким объектам категории накопленного экологического ущерба [3]. Тем не менее, формирование пустошей происходит в результате длительного накопления поллютантов, разрушение естественных природных биогеоценозов изменяет режим циркуляции атмосферного воздуха, влаги и др., водные источники и почвенные субстраты становятся источником загрязнения гидросферы тяжелыми металлами (ТМ). Согласно оценкам авторов [4], даже после закрытия производства длительность периода, когда будет происходить выщелачивание токсичных соединений и вынос их за пределы загрязненной территории, составит несколько сотен лет. Имеющиеся на сегодняшний день способы устранения накопленного экологического ущерба, обусловленного образованием техногенных пустошей, являются неприемлемыми для зоны Арктики в связи с климатическими и геохимическими особенностями рассматриваемых антропогенных ландшафтов [5].

Самоочищение водных и почвенных объектов импактных зон медно-никелевых комбинатов, понимаемое специалистами в области геохимии как естественное разрушение экотоксиканта в среде в результате природных физических, химических и биологических процессов, является невозможным из-за отсутствия для ТМ соответствующих механизмов. Формирование вторичной устойчивой и необратимой техногенной трансформации ландшафта, связанное с выносом мобильных в данной обстановке техногенных веществ за его пределы [6], потребует, как было отмечено выше, длительного времени. С точки зрения экологической безопасности самоочищение экосистемы включает все те природные процессы, которые приводят к выведению загрязнителя за пределы трофической цепи; в данном случае ведущую роль играют процессы пролонгированной фиксации загрязнителя в почвенном поглощающем комплексе, не обязательно сопровождающиеся разрушением либо выведением за пределы ландшафта экотоксиканта [6].

В рамках такого подхода коллективом сотрудников Кольского научного центра РАН предложен способ ремедиации высоко загрязненной зоны, расположенной в непосредственной близости от медно-никелевого предприятия, путем снижения уровня

закисления водных и почвенных объектов и уменьшения интенсивности миграционных процессов с участием поллютантов. Способ предусматривает фиторекультивацию с применением минеральных субстратов (мелиорантов) из горнопромышленных отходов в качестве экранирующего слоя, защищающего корневые системы растений от негативных факторов [7]. Для реабилитации водных объектов с повышенным уровнем загрязнения ТМ предложен магнезиально-силикатный реагент на основе серпентиновых минералов, входящих в состав отходов различных горнопромышленных предприятий [8].

Натурные испытания предлагаемых технологий выполнены в условиях Субарктики в районе г. Мончегорска [9]. На севере Мурманской области в арктической зоне расположено еще одно подразделение ОАО «Кольская ГМК» (площадка г. Заполярный). В связи с тем, что особенностью предлагаемых технологий является протекание физико-химических и биологических процессов в условиях взаимодействия с природными факторами, условием распространения предложенных подходов на зону Арктики является получение новых данных о влиянии более жестких климатических условий на характеристики систем, сформированных с целью иммобилизации тяжелых металлов в пределах техногенного ландшафта.

Целью исследований являлась разработка научных основ экологически безопасного способа ремедиации водных и почвенных объектов с применением адаптивных технологий создания культурфитоценозов на закисленных и загрязненных тяжелыми металлами техногенных ландшафтах арктического региона. В задачу исследований входило изучение влияния низких температур на кинетические и равновесные характеристики процесса взаимодействия магнезиально-силикатного реагента с растворами ТМ; обоснование необходимости применения минеральных отходов в технологии фиторекультивации нарушенного ландшафта путем проведения модельных экспериментов по влиянию криогенеза техногенного грунта на мобилизацию ТМ, в том числе в присутствии вермикулитового субстрата; формирование растительного покрова на основе использования гидропонной экспресс-биотехнологии и серпентинсодержащих отходов обогащения флогопитовых руд ООО «Ковдорслюда» в натурных условиях Арктики (г. Заполярный, Мурманская обл.) и его мониторинг в течение первого вегетационного сезона.

Сравнение климатических условий арктических и субарктических районов Мурманской области

Особенностью территории России является значительные природно-обусловленные отличия климата отдельных регионов [10], что наблюдается, в частности, и для Мурманской области. Её центральная часть характеризуется более устойчивым континентальным климатом по сравнению с районами, близкими к побережьям [11]. В целом климатические условия области неблагоприятны для растительности, несмотря на хорошее увлажнение и длительный световой период, так как сумма температур воздуха выше 10°C за вегетационный период на юге составляет 1127°C, а на севере — всего 870°C [12].

Для сравнения локальных участков территории вблизи городов Мончегорск и Заполярный проанализированы данные метеорологических наблюдений в течение вегетационного сезона 2014 года. В естественных условиях одним из ведущих факторов, ограничивающим рост, развитие, продуктивность, а также распространение растений, выступает температурный фактор, который проявляется как многопараметрическая характеристика среды. Так, среднемесячные температуры воздуха в июне-сентябре и минимальная температура на почве в Мончегорске выше,

чем в Заполярном на 1-1,5 градуса. В июне и июле сумма осадков в 1,5–2 раза выше в Мончегорске, в то время как в августе и сентябре данный показатель для двух городов отличается незначительно. Наиболее существенное отличие зафиксировано для такого важного показателя, как количество дней с температурой выше 10°C. Продолжительность периода активной вегетации составила 74 дня для Мончегорска и 66 – для г. Заполярный.

Таким образом, судя по метеорологическим данным импактные зоны медно-никелевых предприятий, расположенных в Мурманской области и относящихся к различным климатическим зонам (Арктики и Субарктики), существенно отличаются по условиям произрастания растений.

Влияние низких температур на равновесные и кинетические характеристики процесса взаимодействия магнезиально-силикатного реагента с растворами ТМ

Магнезиально-силикатный реагент, получаемый термообработкой серпентинсодержащих материалов, сочетает в себе свойства оксида магния и активного кремнезема. Результаты исследования взаимодействия реагента с сульфатными растворами меди, никеля, цинка показали, что в процессе осаждения ТМ принимают участие как оксид магния, обуславливающий нейтрализацию исходных кислых растворов, так и активный кремнезем, обеспечивающий в соответствующих условиях фиксацию ТМ в матрице реагента. Так, например, при исследовании Ni-систем установлено, что состав Ni-содержащей осажденной фазы с увеличением продолжительности взаимодействия изменяется от гидроксида никеля к ортосиликату и затем, через месяц, при низких концентрациях и $pH > 8$ наблюдается тенденция к увеличению роли метасиликата никеля в смешанном никель-силикатном соединении. Получены положительные результаты по очистке модельных растворов и проб природно-антропогенной воды образцами реагента из сырья различного состава.

Внесение реагента в раствор способствует увеличению щелочности. Например, при очистке пробы воды из типичного загрязненного водного объекта, расположенного в импактной зоне медно-никелевого комбината, pH изменяется от 6,2 до 10,1, концентрации основных поллютантов – меди и никеля – снижаются приблизительно на порядок. За сутки взаимодействия концентрация никеля изменяется от 720 до 20 мкг/л, меди – от 80 до 12 мкг/л. С увеличением времени взаимодействия до 9-ти месяцев pH суспензии снижается за счет поглощения углекислого газа из воздуха до значения 8,6, при этом концентрации Cu и Ni остаются на уровне нескольких мкг/л.

Согласно результатам выполненных ранее многочисленных экспериментов, для большинства проб из загрязненных водных объектов степень очистки растворов является достаточно высокой и составляет величину порядка 96-99%. Наблюдается корреляция показателей степени очистки, рассчитанных по концентрации никеля и по индексу контроля биосферы. Остаточные концентрации никеля через три месяца контакта реагента с водными растворами составляют 5-14 мкг/л при значении pH 8,5-8,8. Данные показатели близки либо соответствуют нормам, установленным для рыбохозяйственных водоемов.

Эксперименты в натуральных условиях показали принципиальную возможность применения реагента в «пассивной» технологии, предусматривающей иммобилизацию ТМ в пределах водного объекта путем распределения реагента в объеме воды. Для получения надежного результата при проведении опытно-промышленных испытаний необходимо соблюдение дополнительных условий. Прежде всего это наличие дешевого и доступного сырья для получения реагента. Кроме того, необходимо выполнить

комплекс исследований по влиянию климатических факторов на эффективность реагента.

Решение первой из поставленных задач стало возможным благодаря разработке способа обогащения отходов добычи флогопита ООО «Ковдорслюда» и получению из них материала с повышенной концентрацией серпентиновых минералов. Отметим, что в продукте обогащения в качестве примеси содержится вермикулит. В связи с этим в данной работе представлены данные о сорбционных свойствах не только магнезиально-силикатного реагента, но и термовермикулита.

Климатическими факторами, влияющими на процесс взаимодействия магнезиально-силикатного реагента с растворами ТМ, являются температура и изменение условий контакта с атмосферным воздухом в период ледостава, когда водная система переходит от открытой к закрытой. В настоящей работе исследовано влияние температуры на процесс взаимодействия магнезиально-силикатного реагента с раствором сульфата никеля.

Система реагент-раствор сульфата никеля изучена методами экспериментального и термодинамического моделирования. Согласно расчетным данным (пакет программ HCh), понижение температуры в интервале, соответствующем показателям водных источников арктических регионов в периоды летней и зимней межени (от $+10^{\circ}\text{C}$ до 0°C), приводит к растворению осадка силиката никеля и увеличению концентрации Ni в растворе, т.е. к снижению сорбционной способности реагента. Аналогичное явление наблюдали авторы работы [13]. Результаты исследования взаимодействия меди с бентонитом и $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ показали, что при понижении температуры величина адсорбции уменьшается. Данный фактор следует учитывать при интерпретации процесса мобилизации тяжелых металлов из техногенных грунтов в период отрицательных температур.

Понижение температуры влияет и на кинетические характеристики систем, формирующихся в результате взаимодействия реагента с растворами ТМ. Скорость роста pH суспензий уменьшается в результате снижения скорости растворения щелочного компонента – оксида магния. Уменьшается и скорость извлечения меди и никеля из растворов. Та же тенденция замедления осаждения компонентов наблюдается и при очистке растворов термовермикулитом, хотя скорость увеличения pH в последнем случае выше при 0°C по сравнению с экспериментом, выполненным при $+20^{\circ}\text{C}$. Полученные данные свидетельствуют об отличии механизмов сорбции ТМ термоактивированными серпентином и вермикулитом.

Сопоставимые остаточные концентрации ТМ получены при более низких значениях pH при взаимодействии растворов с термовермикулитом по сравнению с опытами с реагентом. В отличие от реагента, состав которого можно представить как композицию из аморфных оксидов магния и кремния, термовермикулит не содержит избытка щелочного компонента, что позволяет допустить осаждение ТМ преимущественно за счет ионного обмена и адсорбции на активных центрах, в некоторой степени, возможно, и за счет образования гидроксосоединений. При взаимодействии растворов ТМ с реагентом создается щелочная среда, что обуславливает протекание гидролитических реакций образования малорастворимых соединений.

Таким образом, судя по результатам физико-химических исследований, при низких температурах, характерных для районов Арктики и Субарктики, эффективность применения предложенного ранее магнезиально-силикатного реагента на основе серпентиновых минералов для очистки растворов от ТМ будет снижена. Уменьшение подвижности ТМ и предотвращение их миграции из техногенного грунта становится

приоритетной задачей, решаемой путем восстановления растительного покрова на нарушенных территориях.

Влияние криогенеза техногенного грунта на мобилизацию тяжелых металлов в присутствии вермикулитового субстрата

Благоприятным фактором для проведения работ по рекультивации нарушенных территорий является потепление климата, которое наиболее заметно в северных широтах. В условиях сильного загрязнения особое внимание следует уделить изменению миграционного статуса ТМ в результате проведения восстановительных мероприятий. Авторами работы [14] показано, что по мере развития процессов деградации почвенного покрова происходит миграция ТМ в нижележащие почвенные горизонты. Очевидно, что замедлить или даже остановить этот процесс можно путем восстановления растительного покрова.

Следует отметить, что формирование защитного слоя будет способствовать также перестройке ландшафтных условий за счет возникновения таких стабилизирующих факторов, как увеличение влажности грунтов, накопление органики в почве, развитие влаголюбивой моховой растительности [15]. Поскольку для восстановления растительности требуется применение минеральных субстратов, в работе исследовано влияние одного из них – термовермикулита – на процесс криогенного выветривания компонентов техногенного грунта.

Изучение криогенеза техногенного грунта выполнено с использованием представительного образца, отобранного в непосредственной близости от источника загрязнения (ОАО «Кольская ГМК», площадка г. Мончегорск). Наши исследования показали, что подвижная форма никеля связана преимущественно с минеральными частицами грунта, меди - с органической фазой.

В результате проведения экспериментов (-18 / +20°C, 10 циклов, максимальная продолжительность выдержки при отрицательной температуре 120 часов [16]) установлено, что компоненты грунта не претерпевают изменений в процессе как циклического, так и непрерывного замораживания, что связано, вероятно, с устойчивостью техногенных фаз к факторам выветривания.

Для проверки данного предположения из образца грунта выделили магнитную фракцию, в которой концентрируются экотоксиканты в виде минеральных частиц. Именно минеральные частицы содержатся в аэротехногенных выбросах, причем известно, что минеральные частицы подвержены процессам механического разрушения в процессе криогенеза [17 и др.], а сульфидные минералы претерпевают и химические изменения [16].

Содержание никеля в магнитной фракции составляет величину порядка 1-3%, меди – 0,3%. Методом рентгеновского микроанализа (электронный микроскоп SEM LEO 420 с приставкой INCA, аналитик В.В. Семушин) установлено, что в наиболее высоких концентрациях – до 0,5 мол.% - медь содержится в частицах сульфидов, состав которых отвечает формуле CuFeS . Никель в составе сульфидов не обнаружен, он содержится в частицах сферической формы, которые составляют основную массу магнитной фракции и представляют собой конгломерат оксидов железа и силикатов магния, кальция, реже алюминия. Форма никельсодержащих частиц указывает на образование их в высокотемпературных технологических процессах. Полученные результаты согласуются с данными работы [18], в которой проанализирован состав пылевых выбросов различных переделов комбината.

Таким образом, незначительное количество сульфидов меди не позволило выявить их трансформацию в условиях эксперимента. Опираясь на полученные в

работе сведения о составе никельсодержащей фазы, в которой отсутствуют сульфиды, можно предположить, что она является устойчивой по отношению к криогенному выветриванию. Судя по результатам выполненных экспериментов, степень фиксации ТМ органической фазой техногенного грунта также не изменилась.

Известно, что глинистые минералы, напротив, претерпевают существенные изменения при попеременном замораживании и оттаивании, причем общим направлением их трансформации является разрушение всех типов структурных групп [17]. Наши эксперименты со вспученным вермикулитом, а вермикулит относят к глинистым минералам, подтвердили данное наблюдение. Установлено, что термовермикулит, который служит основой для формирования травяной дернины и присутствует в рекультивационном слое, снижает содержание наиболее токсичных водорастворимых и доступных растениям соединений меди и никеля техногенного торфоподобного грунта. Степень очистки почвенного раствора от меди и никеля термовермикулитом достигает значения порядка 75-90% для водорастворимых форм и 15-30% - для доступных растениям форм.

Поскольку термовермикулит используется для выращивания ковровой дернины, применяемой в технологии рекультивации техногенного грунта, его способность снижать концентрацию не только водорастворимых, но и доступных для растений форм ТМ является благоприятным фактором, нивелирующим воздействие токсичных компонентов аэротехногенных выбросов на корневую систему растений. Согласно результатам наших исследований доступные компоненты связаны преимущественно с органической частью грунта. Ранее было установлено, что комплексы ТМ с растворенным органическим веществом не извлекаются из растворов магнезиально-силикатным реагентом. Способность вермикулита образовывать органоминеральные комплексы может быть использована для иммобилизации органической фракции ТМ природно-антропогенных водных объектов.

Создание искусственного фитоценоза на техногенном грунте в условиях Арктики

Пионерами рекультивации нарушенных территорий Крайнего Севера, подверженных техногенному загрязнению, явились сотрудники Архангельского института леса и лесохимии под руководством Цветкова В.Ф. [19]. Активно занимались проблемой восстановления нарушенных территорий Кольского полуострова сотрудники Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН [20 и др.], работники Мончегорского лесхоза и Университета г. Турку [21 и др.].

Выполненные исследования показали, что в условиях действующего предприятия создание искусственных культурфитоценозов на высоко загрязненном техногенном грунте требует особого подхода. Создание устойчиво функционирующих растительных сообществ обуславливает необходимость применения адаптивных технологий, учитывающих локальные условия их формирования. В первую очередь следует защитить корневую систему растений от влияния токсичного грунта. Кроме того, опыт проведения рекультивации и озеленения на таких территориях показал, что привозной незагрязненный грунт, традиционно используемый для этих целей, в течение нескольких лет накапливает компоненты атмосферных выбросов и становится токсичным для растений. Данные обстоятельства свидетельствуют о необходимости нанесения на техногенный грунт слоя субстрата (мелиоранта), обладающего кислотонейтрализующими свойствами. В качестве такого материала предложено использовать горнопромышленные отходы, содержащие карбонаты и силикаты кальция и магния [22].

При проведении рекультивации помимо негативных техногенных факторов следует учитывать и особенности функционирования растительных сообществ в суровых климатических условиях циркумполярных областей. Это короткий вегетационный период, возможность резкого понижения температуры, периодический дефицит влаги в почве, отсутствие банка семян, доминирование вегетативного пути размножения местной растительности и др. [23, 24]. Для создания благоприятных условий формирования посевных фитоценозов является целесообразным применение агровермикулита. Обладая такими свойствами как высокая воздухо- и влагоемкость и низкая теплопроводность, этот субстрат способствует созданию в среде прорастания семян режима, оптимального по температуре, аэрации и влажности, и, тем самым, сокращению сроков формирования создаваемого фитоценоза, что особенно важно в суровых климатических условиях северных широт [25].

С учетом совокупности перечисленных негативных факторов и возможных способов адаптации к ним растений разработана технология рекультивации техногенного грунта, включающая посев семян растений, устойчивых к воздействию аэротехногенных выбросов, на сформированное на поверхности грунта комплексное покрытие, состоящее из экранирующей подложки (мелиоранта) и слоя вермикулитового субстрата.

Создание растительного покрова на участке техногенно-нарушенного ландшафта арктической зоны начато в непосредственной близости от источника загрязнения (ОАО Кольская ГМК, площадка Заполярный, Мурманская обл.). Основой инновационного решения является комплексное использование гидропонной экспресс-биотехнологии настила готовой к укладке ковровой травяной дернины, предусматривающей применение местных травянистых злаковых растений и вермикулитового субстрата-почвозаменителя, а также подложки из горнопромышленных отходов (мелиорантов). При закладке опыта использован наиболее перспективный в условиях Мурманской области материал (сунгулитовые отходы добычи флогопита ООО «Ковдорслюда»), содержащий нейтрализующие кислотность компоненты.

Результаты анализа грунта экспериментальной площадки показали, что наиболее существенное отличие от контрольного образца (ПОСВИР, г. Апатиты) наблюдается для приоритетных экотоксикантов – меди и никеля. Отношение содержания доступных компонентов в техногенно загрязненных и контрольном образцах показывает, что для элементов питания (К, Са, Mg, Р) наблюдается существенный дефицит, для петрогенных элементов – незначительное отклонение от контроля, а для компонентов пылегазовых выбросов медно-никелевого комбината – существенное превышение над контрольными показателями.

Несмотря на климатические особенности вегетационного сезона 2014 г. (засушливый июль и август) и связанный с этим недостаток влаги в песчаном экранирующем слое отходов, с помощью данного технологического решения всего за 2 месяца (с 18.07 по 19.09) на опытных делянках были сформированы искусственные культурфитоценозы с заданным видовым составом и удовлетворительными качественными характеристиками. В контрольном варианте ковровая травяная дернина, постеленная на техногенный грунт (вариант без использования подложки) полностью погибла.

Использованный в эксперименте экспресс-способ создания искусственных фитоценозов позволил заранее спланировать его видовой состав, сроки создания и сократить затраты на формирование. Составляющие фитоценоз многолетние злаки (пырей сизый (*Agropyron intermedium* (Host.) Beauv.), овсяница красная (*Festuca rubra* L.), тимopheевка луговая (*Phleum pratense* L.)) способствовали формированию

растительных сообществ с диффузным (однородным) сложением и равномерным распределением видов.

Общий вид и степень развития созданных культурфитоценозов позволили заключить, что использованный в эксперименте мелиорант на основе сунгулитовых отходов является комфортным субстратом для роста и развития составляющих его злаков. Из трех видов овсяница красная характеризовалась наименьшим ростом; высота растений этого вида не превышала 10.2 ± 0.03 см. Максимальная высота растений тимopheевки луговой и пырея сизого достигала 24.1 ± 0.1 , а медианная – 12.0 ± 0.5 см. К концу сезона все растения находились в фазе вегетации и за непродолжительный по времени период сформировали от 2-х (овсяница красная) до 4-х (пырей сизый и тимopheевка луговая) настоящих зеленых листа. Растения занимали всю исходную площадь делянок, их проективное покрытие во всех повторностях составило 100%. Однако плотность травостоя, оставаясь на довольно высоком уровне (на 1 м^2 насчитывалось до 850 ± 40 стеблей травянистых растений), по сравнению с исходным значением к сентябрю уменьшилась на 20%.

Толщина слоя мелиоранта, его химический состав и физические характеристики оказали положительное влияние на развитие корневой системы растений, обеспечившей их интенсивное питание и формирование мощной, способной противостоять на разрыв, дернины (рисунок 5б). Корни растений всецело охватывали 1 см слой вермикулитового субстрата в ковровом покрытии и 10 см слой мелиоранта. За счет высокой плотности травостоя и биомассы корней мощность дернины достигла $10 \pm 0,5$ см, что способствовало поддержанию созданного культурфитоценоза в устойчивом состоянии, сохранению стабильного плотного травостоя и высокой биологической продуктивности (до 280 г воздушно-сухого вещества на квадратный метр). Ведущая роль в его формировании принадлежала пырею сизому и тимopheевке луговой, накопившим наибольший запас надземной биомассы. Вклад популяции овсяницы красной, чья высота и облиственность были гораздо ниже, оказался несравнимо меньшим.

Таким образом, ковровые травяные покрытия, использованные в данном эксперименте, продемонстрировали абсолютную эффективность с точки зрения поставленных задач: в короткие сроки (за 2 месяца) создали на месте уничтоженного растительного покрова устойчивые фитоценозы из сообщества популяций, в большинстве своем обладающих удовлетворительным ростом и развитием, высокой продуктивностью, с достаточными адаптивными возможностями в экстремальных арктических условиях, способных противостоять аэротехногенному воздействию и, тем самым, ускорять восстановительную сукцессию.

Данный способ рекультивации легко встраивается в существующую экосистему, не изменяя ее, поскольку в его основе местные, присущие данному региону виды растений и субстратов (вермикулитовый субстрат-почвозаменитель, полученный из природного минерала – ковдорского вермикулита, и серпентинсодержащие отходы обогащения флогопитовых руд ООО «Ковдорслюда» (Мурманская обл.)).

Заключение

По итогам исследований, выполненных в рамках проекта в 2014 году, показано, что длительный период отрицательных температур снижает эффективность применения предложенного ранее магнезиально-силикатного реагента на основе серпентиновых минералов для очистки растворов от тяжелых металлов. Методами экспериментального и термодинамического моделирования установлено, что при низких температурах уменьшается скорость осаждения и увеличивается равновесная

концентрация ТМ. Снижение подвижности ТМ и предотвращение их миграции из почвенного покрова в прилегающие водоемы становится приоритетной задачей, решаемой путем создания геохимического барьера и восстановления растительного покрова на нарушенных территориях.

Подтверждена на практике перспективность применения для этих целей инновационного технологического решения, предусматривающего совместное использование гидропонной экспресс-биотехнологии и горнопромышленных отходов. Показана возможность применения серпентин- и вермикулитсодержащих отходов ООО «Ковдорслюда» и продуктов их обогащения в качестве материалов природоохранного назначения. Данные отходы могут служить также сырьем для получения агровермикулита. Указанное обстоятельство дает возможность выполнить фиторекультивацию при минимальных затратах на материалы, которые необходимы для ее проведения согласно предлагаемой технологии. Установлено, что термовермикулит, который служит основой для формирования травяной дернины и присутствует в рекультивационном слое, способствует снижению содержания наиболее токсичных водорастворимых и доступных для растений соединений меди и никеля.

Полученные данные позволяют говорить о целесообразности и перспективности применения в Арктической зоне РФ комплексной технологии рекультивации техногенного грунта на основе использования инновационной гидропонной экспресс-биотехнологии, предусматривающей применение термовермикулита и мелиорантов из горнопромышленных отходов, содержащих серпентиновые и/или другие минералы, способные взаимодействовать с кислыми растворами.

Дальнейшее развитие исследований связано с изучением влияния мелиорантов на миграционный статус тяжелых металлов, механизмов адаптации растений к неблагоприятным экологическим и климатическим факторам с целью обоснованного выбора параметров технологии рекультивации техногенно загрязненных ландшафтов.

1. В.А. Маслобоев. *Вестник Кольского научного центра РАН*, 2009. № 1, 24-33.
2. Б. Г. Саксин, М. Б. Бубнова. *Тихоокеанская геология*, 2006, **25**, 67-76.
3. Ю. И. Соколов. *Арктика: экология и экономика*, 2013, **10**, 18-27.
4. D. G. Gundermann, T. C. Hutchinson. *Journal of Geochemical Exploration*, 1995, **52**, 231-236.
5. И.П. Кременецкая, В.В. Лащук, Е.Ю. Волочковская, С.В. Дрогобужская, Т.А. Морозова. *Цветные металлы*, 2012, №7, 35-40.
6. Э.В. Соботович, В.В. Долин. *Современные проблемы экологической стабилизации биосферы*, 2013, **22**, 22-42.
7. В.Т. Калинин, И.П. Кременецкая, Л.А. Иванова, М.В. Слуковская, Т.Т. Горбачева, С.А. Алексеева, В.В. Лащук, С.В. Дрогобужская. *Вестник Кольского научного центра РАН*, 2014, №2, 78 – 88.
8. И.П. Кременецкая, О.П. Корытная, Т.Н. Васильева. *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*, 2008, № 4, 33-40.
9. Л.А. Иванова, Т.Т. Горбачева, М.В. Слуковская, И.П. Кременецкая, Е.С. Иноземцева. *Экология производства*, 2014, №2, 58-68.
10. Н.Н. Филатов, Л.Е. Назарова, А.П. Георгиев, А.В. Семенов, А.Р. Анциферова, В.Н. Ожигина, М.И. Богдан. *Арктика: экология и экономика*, 2012, №2, 80-93.
11. О.Б. Гонтарь, В.К. Жиров, Л.А. Казаков, Е.А. Святковская, Н.Н. Тростенюк. *Зеленое строительство в городах Мурманской области*, 2010, 224 с.
12. URL: http://trasa.ru/region/murmanskaya_clim.html, дата обр. 11.12.2014.
13. В. И. Федосеева. *Физико-химические закономерности миграции химических элементов в мерзлых грунтах и снеге*, 2003, 140 с.

14. М.Г. Опекунова, Е.Ю. Елсукова, В.А. Чекушин, О.В. Томилина, Р. Салминен, К. Рейманн. *Вестник СПбГУ*, 2006, 7(3), 39-49.
15. В.Н. Конищев. *Криосфера Земли*, 2011, **15**, 15–18.
16. А.Б. Птицын, Т.И. Маркович, В.А. Павлюкова, Е.С. Эпова. *Геохимия*, 2007, №7, 795-800.
17. В.Н. Конищев, В.В. Рогов. *Криосфера Земли*, 2008, 12, 51–58.
18. V. Varga. *Environment International*, 2002, **28**, 451-456.
19. В.Ф. Цветков, Е.А. Черкисов. *Воздействие промышленных предприятий на окружающую среду*, 1987, 112-119.
20. Н.В. Лукина, В.В. Никонов. *Лесоведение*, 1999, №2, 57-67.
21. М. V. Kozlov, E. L. Zvereva. *Water Air Soil Pollut.*, 2007, № 186, 183–194.
22. Л.А. Иванова, М.В. Слуковская, Е.С. Иноземцева. *Инженерная экология*, 2012, №5(107), 14-31.
23. С. Н. Ганичева, Н. В. Лукина, В. А. Костина, В. В. Никонов. *Лесоведение*, 2004, № 3, 57-67.
24. J. Vangronsveld, F. Van Assche, H. Clijsters. *Environ. Pollut.*, 1995, № 87, 51-59.
25. Л.А. Иванова, В.А. Костина, М.В. Кременецкая, Е.С. Иноземцева. *Вестник МГТУ*, 2010, **13**, 977-983.