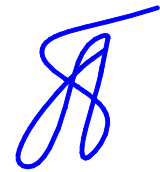


На правах рукописи



Голец Анна Борисовна

**ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ
ПРИ САНАЦИИ И РЕКУЛЬТИВАЦИИ
ТЕХНОГЕННО ИЗМЕНЕННЫХ ГРУНТОВ**

Специальность 1.6.21. Геоэкология

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург - 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС).

Научный руководитель: **Шершнева Мария Владимировна**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Инженерная химия и естествознание» ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

Официальные оппоненты: **Сольский Станислав Викторович**

доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник лаборатории «Фильтрационные исследования» им. акад. Н. Н. Павловского отдела «Основания, грунтовые и подземные сооружения» АО «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева»

Подлипский Иван Иванович

кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры «Геологии и геоэкологии» ФГБОУ ВО «Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

Защита диссертации состоится «12» октября 2023 г. в 11:00 (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.339.04, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» по адресу: г. Москва, Ярославское шоссе, 26, Зал Ученого Совета.

С диссертацией, авторефератом можно ознакомиться на сайте www.mgsu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 202__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Сысоева Елена
Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования обусловлена тем, что за последние пять лет по данным государственных докладов Минприроды России «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации» наблюдаются высокие уровни загрязнения земель тяжелыми металлами в различных городах России, а в Санкт-Петербурге почти треть земель не соответствует нормативным показателям.

В Государственном докладе «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2018 году» Роспотребнадзора показано трехкратное превышение химического загрязнения земель по сравнению со среднероссийским в Приморском крае (более 40%), Новгородской области (более 28%), г. Санкт-Петербурге (более 27%), Мурманской области (более 23%), Кировской области (более 21%).

Приведенный в докладе (2019 г.) Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности г. Санкт-Петербурга, анализ динамики загрязнения земель (1990 - 2019 г.г.) показал увеличение концентрации тяжелых металлов в пяти административных районах города. Земли городских экосистем, концентрируя в себе различные токсические соединения, становятся техногенно измененными дисперсными грунтами, не выполняющими функцию биогеохимического барьера для загрязнений. «Концепция экологических обследований и рекультивации земель на территории Санкт-Петербурга» доказывает, что санация и рекультивация таких грунтов позволит снизить негативное воздействие на население и окружающую среду, обеспечит эффективное использование бывших промышленных площадей и снизит объем размещения их на полигонах.

В строительной отрасли используют сульфатсодержащие материалы, к которым в том числе относятся гипсовые и магнезиальные вяжущие. На их основе получают гипс, гипсовый кирпич, поризованные блоки, магнолит. Кроме строительных материалов и изделий, некоторые природные растворы (морская вода и воды сульфатного класса магниевой группы) также имеют сульфатную природу. Если сульфатсодержащие строительные материалы и природные воды обладают способностью обезвреживать ионы свинца и других тяжелых металлов, то они могут быть использованы при санации и рекультивации техногенно измененных дисперсных грунтов, загрязненных ионами тяжелых металлов.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 1.6.21 – Геоэкология (технические науки) по пункту: 17 «Ресурсосбережение, санация и рекультивация земель, утилизация отходов производства и потребления, в том числе возникающих в результате добычи, обогащения и переработки полезных ископаемых, строительной, хозяйственной деятельности и эксплуатации ЖКХ.

Геоэкологическое обоснование безопасного размещения, хранения и захоронения токсичных, радиоактивных и других отходов».

Объект исследования: геосистемы литосферы, в виде техногенно измененных дисперсных грунтов, загрязненных ионами тяжелых металлов.

Предмет исследования: методы обезвреживания ионов тяжелых металлов при санации и рекультивации техногенно измененных грунтов.

Степень разработанности темы исследования. В области ресурсосбережения, санации и рекультивации земель и утилизации отходов большой вклад внесен работами Свергузовой С.В. «Возможности адсорбционного извлечения ионов тяжелых металлов», Шершневой М.В. «Технологические решения по очистке техногенных грунтов от ионов тяжелых металлов», Сычевой А.М. «Исследование процессов обезвреживания ионов тяжелых металлов при взаимодействии с силикатсодержащими модельными системами», Бабак Н.А. «Геохимические особенности реагентов для иммобилизации тяжелых металлов при очистке биосферы» и других ученых.

В области геоэкологической безопасности большой вклад внесен учеными Слесаревым М.Ю. «Формирование систем экологической безопасности строительства», Теличенко В.И. «Материаловедческие аспекты геоэкологической и экологической безопасности в строительстве», Тупицыной О.В. «Методы и программные комплексы, применяемые для оценки масштабов техногенных загрязнений», Чертесом К.Л. «Оценка состояния и подходы к восстановлению геосреды нарушенной в результате строительно-хозяйственной деятельности» и другими.

Цель диссертационной работы: исследование процесса обезвреживания ионов тяжелых металлов в техногенно измененных дисперсных грунтах при их санации и рекультивации с использованием искусственного магнезиального и гипсового камня, а также природных растворов.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

1. Проанализировать методы санации и рекультивации техногенно измененных дисперсных грунтов для использования искусственного магнезиального и гипсового камня, а также природных растворов при обезвреживании ионов тяжелых металлов;
2. Обосновать и исследовать обезвреживающие свойства искусственного магнезиального и гипсового камня для санации и рекультивации техногенно измененных дисперсных грунтов от ионов свинца, и возможность управления свойствами путем введения модификаторов для обезвреживания других ионов тяжелых металлов (ИТМ);

3. Разработать и провести апробацию обезвреживания ионов свинца в техногенно измененных дисперсных грунтах с использованием магнезиального и гипсового камня, а также природных растворов.

Научная новизна:

1. Предложен критерий для геоэкологического обоснования использования искусственного магнезиального и гипсового камня при санации и рекультивации техногенно измененных дисперсных грунтов, позволяющий осуществлять обезвреживание ИТМ путем самопроизвольного образования труднорастворимых безопасных соединений, являющихся аналогами природных минералов.

2. Доказано, что емкость магнезиального камня при санации и рекультивации техногенно измененных дисперсных грунтов от ионов свинца составляет 6 мг/г. Установлено, что введение модификаторов в магнезиальный и гипсовый камень повышает емкости по отношению к ионам свинца до 27,5 мг/г, по отношению к ионам меди, кадмия, марганца, железа и кобальта составляет от 12,5 до 27,9 мг/г, при этом обезвреживание протекает самопроизвольно.

3. Установлено, что изменение температуры окружающей среды от 1 до 40 °С не влияет на емкость магнезиального и гипсового камня, их емкость увеличивается в зависимости от дозы модификатора, и материалы не обладают селективностью, что обеспечивает одновременное обезвреживание различных ИТМ при санации и рекультивации техногенно измененных дисперсных грунтов.

Теоретическая значимость работы:

1. Предложенный критерий для геоэкологического обоснования использования искусственного магнезиального и гипсового камня позволяет минимизировать негативное воздействие ионов свинца и других тяжелых металлов при санации и рекультивации техногенно измененных дисперсных грунтов.

2. Разработаны формулы для расчета дозы искусственного магнезиального и гипсового камня, а также природных растворов для санации и рекультивации техногенно измененных дисперсных грунтов при обезвреживании ионов свинца и других тяжелых металлов.

3. Теоретически обоснована возможность управления обезвреживающими свойствами искусственного магнезиального и гипсового камня и предложены два способа введения модификатора, во-первых, при их изготовлении, во-вторых, путем пропитки готового изделия.

Практическая значимость работы:

1. Проведена апробация санации от ионов свинца до уровня ПДК техногенно измененного дисперсного грунта с использованием гипсового камня, а также природными растворами путем инъектирования и орошения. По результатам апробации получены соответствующие акты.

2. По результатам апробации проведена качественная и количественная оценка на основе расчёта индекса RQ и предотвращенного экологического ущерба. Значение индексов RQⁿ предлагаемых методов по сравнению с технологией утилизации техногенного грунта выше на 90%, величина предотвращенного экологического ущерба составляет 2 580,30 тыс. руб/год.

3. Материалы диссертации используются в учебном процессе ФГБОУ ВО ПГУПС при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 «Строительство».

Практическая значимость и техническая новизна предлагаемых способов подтверждена пятью патентами на изобретения.

Методология и методы исследования. При выполнении работы применялись следующие методы исследования: оценка качества методом расчёта индекса RQ, индикаторный метод, ионометрический метод, микроскопический метод.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Предложенный критерий для геоэкологического обоснования использования искусственного магнезиального и гипсового камня при санации и рекультивации техногенно измененных дисперсных грунтов, позволяющий осуществлять обезвреживание ИТМ путем самопроизвольного образования труднорастворимых безопасных соединений, являющихся аналогами природных минералов.

2. Емкость магнезиального камня для санации и рекультивации техногенно измененных дисперсных грунтов от ионов свинца составляет 6 мг/г, а введение модификаторов в магнезиальный и гипсовый камень повышает емкости по отношению к ионам свинца до 27,5 мг/г, по отношению к ионам меди, кадмия, марганца, железа и кобальта составляет от 12,5 до 27,9 мг/г, при этом обезвреживание протекает самопроизвольно.

3. Изменение температуры окружающей среды от 1 до 40 °С существенно не влияет на емкость магнезиального и гипсового камня, их емкость увеличивается в зависимости от дозы модификатора, и материалы не обладают селективностью, что обеспечивает одновременное обезвреживание различных ИТМ при санации и рекультивации техногенно измененных дисперсных грунтов.

Степень достоверности результатов проведенных соискателем ученой степени исследований подтверждается применением адекватного исследовательского и аналитического аппарата, использованием поверенного лабораторного оборудования, а также апробацией полученных результатов при опытном внедрении. При исследовании емкости материалов погрешность составляла не более 5% при доверительной вероятности 0,95.

Личный вклад автора включает постановку задач исследования, обоснование объектов и методик исследования, проведение лабораторных экспериментов и опытную апробацию предложенных методов, а также формулировку основных научных положений.

Апробация результатов исследований.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научно-практических конференциях: «Transportation Geotechnics and Geocology», TGG 2017 (2017); Far East Con IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (2019); «Инновационные технологии в строительстве и геоэкологии» (2015, 2017, 2018, 2020); «Геоэкохимия защиты литосферы» (2015, 2016, 2017, 2018, 2020, 2021); «Актуальные вопросы науки» (2016); «Транспорт: проблемы, идеи, перспективы» (2017).

Публикации по результатам исследований. Материалы диссертации достаточно полно изложены в 48 научных публикациях, из которых 7 работ опубликованы в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, 2 работы опубликованы в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus, Web of Science, 33 работы опубликованы в других журналах и сборниках трудов, 5 патентов на изобретения, 1 учебное пособие.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы. Работа изложена на 211 страницах машинописного текста, включает 33 рисунка, 36 таблиц и 8 приложений на 66 страницах. Список использованной литературы содержит 286 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показаны актуальность выполненной работы, цель и поставленные задачи. Приведены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, обоснованы защищаемые положения.

В **главе 1** проанализированы существующие методы санации и рекультивации земель от ИТМ, негативное воздействие ИТМ на окружающую среду и комплексная оценка техногенно измененных дисперсных грунтов в Санкт-Петербурге по показателю суммарного загрязнения Z_c по тяжелым металлам и металлоидам и индекс загрязнения почв ИЗП. Индекс Z_c характеризует превышение содержания тяжелых металлов и металлоидов над фоном. ИЗП характеризует превышение содержания загрязнения над ПДК/ОДК (таблица 1).

Таблица 1 – Показатели загрязненности техногенных грунтов в Санкт-Петербурге тяжелыми металлами (по данным Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Санкт-Петербурга, 2020 год)

| Район | Z _{смедiana} | ИЗП _{медiana} | Показатели, превышающие ПДК/ОДК |
|------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------------|
| Василеостровский | 3,5 | 1,5 | Cd, Cu, Pb, Zn |
| Выборгский | 2,4 | 1,0 | Cd, Cu, Ni, Pb, Zn |
| Красносельский | 3,4 | 0,9 | Cd, Cu, Ni, Pb, Zn |
| Московский | 5,7 | 1,3 | Cd, Cu, Pb, Zn |
| Невский | 8 | 1,4 | Cd, Cu, Ni, Pb, Zn |
| Приморский | 2 | 0,8 | Cd, Cu, Ni, Pb, Zn |
| Фрунзенский | 7 | 2,8 | Cd, Cu, Ni, Pb, Zn |
| Центральный | 8,1 | 2,1 | Cd, Cu, Pb, Zn |

Показано, что, несмотря на значительный объем исследований в области санации и рекультивации земель, технологических решений по обезвреживанию ионов свинца и других тяжелых металлов в техногенно измененных дисперсных грунтах недостаточно.

В главе 2 предложен критерий для геоэкологического обоснования использования искусственного магнезиального и гипсового камня при санации и рекультивации техногенно измененных дисперсных грунтов, позволяющий выбрать самопроизвольные процессы обезвреживания. Критерий заключается в том, что обезвреживание ИТМ должно осуществляться путем самопроизвольного образования труднорастворимых безопасных соединений, являющихся аналогами природных минералов.

Оценка самопроизвольного осуществления обезвреживания ИТМ (на примере ионов свинца) магнезиальным и гипсовым камнем и оценка управления обезвреживающими свойствами модифицированных образцов была выполнена по величине изменения изобарно-изотермического потенциала (таблица 2).

Таблица 2 – Изменение изобарно-изотермического потенциала для возможных процессов обезвреживания ИТМ искусственным магнезиальным или гипсовым камнем (на примере ионов свинца)

| № п/п | Процесс | $\Delta G^{0}_{298},$ кДж моль | $\Delta G^{0}_{298},$ кДж т |
|-------|--|--------------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | Взаимодействие гипсового камня с ионами свинца | -20,85 | -12,1·10 ⁴ |
| 2 | Взаимодействие гипсового камня, модифицированного йодидом калия, с ионами свинца | -66,67 | -38,8·10 ⁴ |
| 3 | Взаимодействие гипсового камня, модифицированного карбонатом натрия, с ионами свинца | -100,86 | -58,6·10 ⁴ |
| 4 | Взаимодействие гипсового камня, модифицированного сульфидом натрия, с ионами свинца | -261,56 | -151,9·10 ⁴ |

| № п/п | Процесс | $\Delta G^{\circ}_{298},$ кДж моль | $\Delta G^{\circ}_{298},$ кДж т |
|-------|---|--|---------------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 5 | Взаимодействие магнезиального камня с ионами свинца | -168,81 | $-58,9 \cdot 10^4$ |
| 6 | Взаимодействие магнезиального камня, модифицированного йодидом калия, с ионами свинца | -214,63 | $-74,8 \cdot 10^4$ |
| 7 | Взаимодействие магнезиального камня, модифицированного карбонатом натрия, с ионами свинца | -248,82 | $-86,8 \cdot 10^4$ |
| 8 | Взаимодействие магнезиального камня, модифицированного сульфидом натрия, с ионами свинца | -409,52 | $-142,8 \cdot 10^4$ |

Данные, приведенные в таблице 2, показывают, что изменения изобарно-изотермического потенциала для процессов обезвреживания отрицательны (столбец 3), что обеспечивает самопроизвольность процесса. Возможность управления обезвреживающими свойствами магнезиального и гипсового камня прогнозируется более отрицательными значениями изменения изобарно-изотермического потенциала в присутствии модификаторов (процессы 2-4, 6-8). Если данное положение справедливо, то емкости модифицированных материалов должны быть больше.

Глава 3 посвящена обнаружению и исследованию обезвреживающих свойств магнезиального и гипсового камня, а также природных растворов.

Для исследования обезвреживающих свойств были приготовлены образцы магнезиального и гипсового камня и следующие модельные растворы с концентрацией ионов свинца, марганца, кобальта, железа, кадмия и меди $1 \cdot 10^{-2}$ моль/л.

Результаты определения оптимального времени контакта образцов с ИТМ показали, что их взаимодействие более 48 часов не целесообразно, так как обезвреживание происходит в этот период. В выбранных условиях была исследована емкость магнезиального и гипсового камня (таблица 3).

Таблица 3 – Емкость искусственного магнезиального и гипсового камня

| Масса образца, г | Площадь поверхности образца, см ² | Эффект очистки, % | Остаточная концентрация ионов свинца, мг/л | Емкость | |
|-----------------------------|--|-------------------|--|-------------|--------------------|
| | | | | мг/г | мг/см ² |
| Гипсовый камень | | | | | |
| 9,9 | 24,0 | 99,33 | 25,72 | 38,68 | 15,96 |
| 28,6 | 69,2 | 99,81 | 7,39 | 13,45 | 5,56 |
| 45,9 | 116,1 | 99,86 | 5,28 | 8,39 | 3,32 |
| 68,8 | 164,8 | ≈100,00 | 0,03 | 5,60 | 2,34 |
| Магнезиальный камень | | | | | |
| 9,8 | 23,50 | 99,35 | 24,96 | 39,08 | 16,30 |
| 28,5 | 69,60 | 99,81 | 7,24 | 13,50 | 5,53 |
| 47,3 | 117,20 | 99,87 | 5,02 | 8,14 | 3,28 |
| 64,2 | 164,00 | ≈100,00 | 0,03 | 6,00 | 2,35 |

Для управления обезвреживающими свойствами в образцы были добавлены карбонат натрия, сульфид натрия или йодид калия, которые с ИТМ образуют труднорастворимые соединения. Модификация образцов осуществлялась двумя способами: при их изготовлении или путем пропитки готового изделия соответствующими растворами в течение 48 часов. Результаты исследований показали, что, чем выше доза модифицирующего вещества в магнезиальном или гипсовом камне (или концентрация раствора для пропитки), тем выше его емкость.

В соответствии с высказанной идеей о возможности обезвреживания ионов марганца, кобальта, железа, кадмия и меди, были определены емкости модифицированного магнезиального и гипсового камня по отношению к перечисленным ИТМ (таблица 4).

Таблица 4 – Емкость модифицированного искусственного магнезиального и гипсового камня по отношению к ИТМ

| Материал | Емкость, мг/г (мг/см ²) | | | | | |
|--|-------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | Pb ²⁺ | Mn ²⁺ | Co ²⁺ | Fe ³⁺ | Cd ²⁺ | Cu ²⁺ |
| Гипсовый камень, модифицированный карбонатом натрия | 27,4 (11,4) | 12,8 (5,20) | 12,6 (5,14) | 15,1 (6,22) | 12,5 (5,45) | 13,3 (5,12) |
| Гипсовый камень, модифицированный сульфидом натрия | 27,6 (11,50) | 13,3 (5,43) | 12,9 (5,57) | 15,9 (6,40) | 13,2 (5,36) | 13,5 (5,45) |
| Магнезиальный камень, модифицированный карбонатом натрия | 27,4 (11,05) | 13,1 (5,24) | 12,5 (4,96) | 16,3 (6,30) | 15,1 (6,00) | 14,2 (5,50) |
| Магнезиальный камень, модифицированный сульфидом натрия | 27,9 (11,00) | 14,7 (5,45) | 13,5 (5,24) | 17,2 (6,98) | 15,8 (6,29) | 14,9 (6,12) |

Исследования обезвреживающих свойств магнезиального и гипсового камня в условиях одновременного нахождения в растворе ионов свинца, кадмия и железа показали, что емкость снижается по отношению к емкости по каждому из металлов отдельно (таблица 5, рисунок 1). По результатам исследований селективности по отношению к ИТМ для модифицированного магнезиального и гипсового камня обнаружено не было.

Таблица 5 – Емкость модифицированного искусственного магнезиального и гипсового камня при одновременном присутствии разных ИТМ

| Материал | Емкость по каждому из металлов отдельно, мг/г | | | Емкость, в присутствии других ИТМ, мг/г | | |
|---|---|------------------|------------------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | Pb ²⁺ | Fe ³⁺ | Cd ²⁺ | Pb ²⁺ | Fe ³⁺ | Cd ²⁺ |
| | | | | в присутствии | | |
| | | | | Fe ³⁺ и Cd ²⁺ | Pb ²⁺ и Cd ²⁺ | Pb ²⁺ и Fe ³⁺ |
| Гипсовый камень, модифицированный карбонатом натрия | 27,4 | 15,1 | 12,5 | 11,0 | 7,1 | 8,6 |

| Материал | Емкость по каждому из металлов отдельно, мг/г | | | Емкость, в присутствии других ИТМ, мг/г | | |
|--|---|------------------|------------------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | Pb ²⁺ | Fe ³⁺ | Cd ²⁺ | Pb ²⁺ | Fe ³⁺ | Cd ²⁺ |
| | | | | в присутствии | | |
| | | | | Fe ³⁺ и Cd ²⁺ | Pb ²⁺ и Cd ²⁺ | Pb ²⁺ и Fe ³⁺ |
| Гипсовый камень, модифицированный сульфидом натрия | 27,6 | 15,9 | 13,2 | 10,8 | 7,6 | 9,4 |
| Магнезиальный камень, модифицированный карбонатом натрия | 27,4 | 16,3 | 15,1 | 11,3 | 7,3 | 8,1 |
| Магнезиальный камень, модифицированный сульфидом натрия | 27,9 | 17,2 | 15,8 | 10,2 | 7,2 | 9,8 |

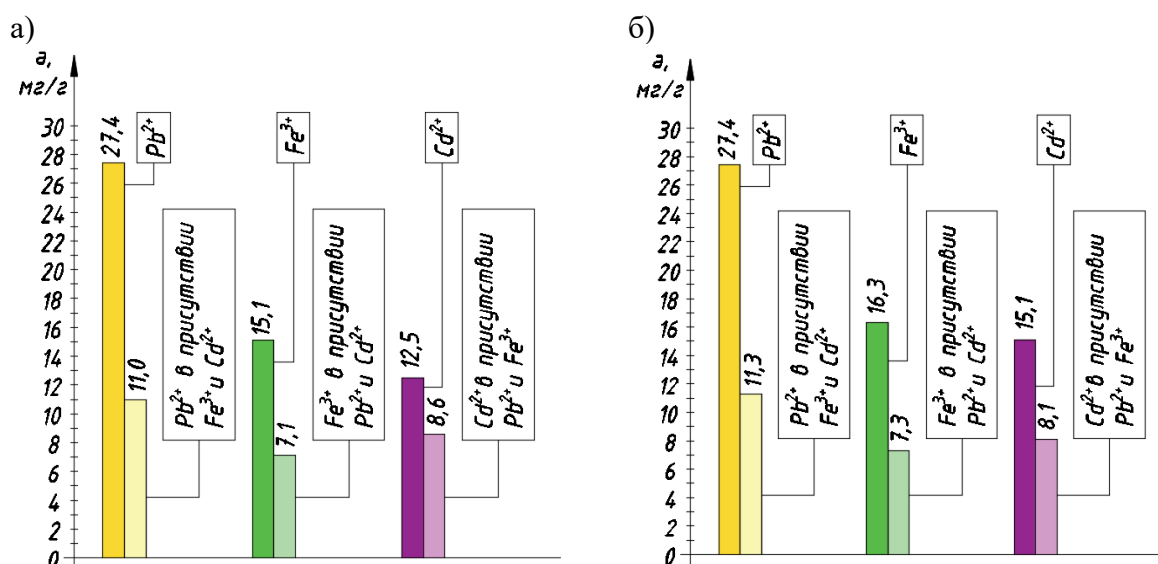


Рисунок 1 – Емкость материалов в условиях одновременного нахождения в растворе ионов свинца, кадмия и железа (на примере модификации карбонатом натрия): а) гипсовый камень, модифицированный карбонатом натрия; б) магнезиальный камень, модифицированный карбонатом натрия

Результаты экспериментов по исследованию величины емкости магнезиального и гипсового камня не выявили ее зависимости от температуры окружающей среды (рисунок 2), что подтверждается расчётами изменения изобарно-изотермического потенциала при разных температурах.

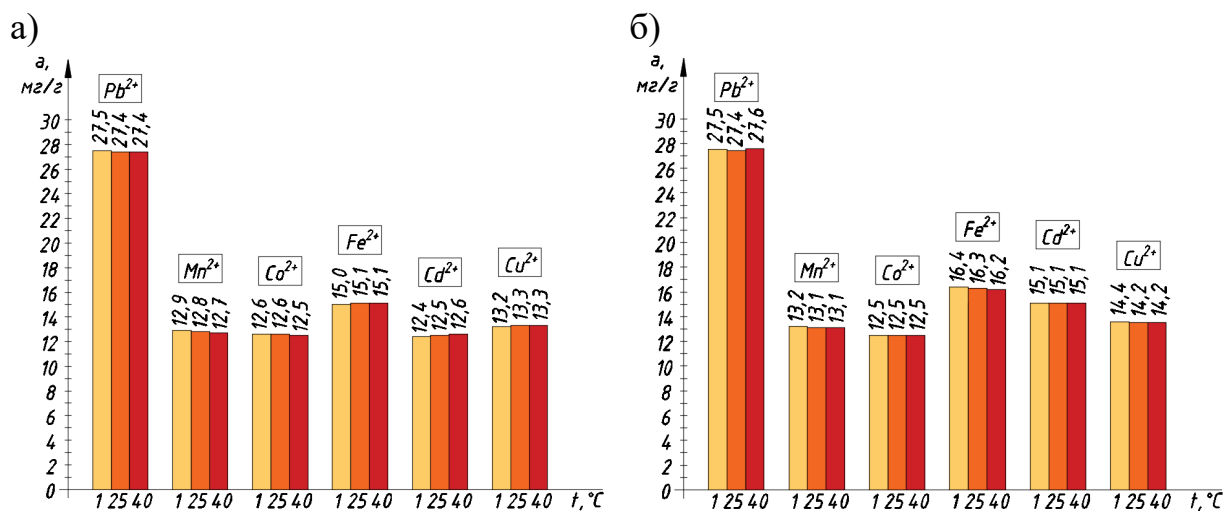


Рисунок 2 – Зависимость емкости материалов от температуры окружающей среды в 1°C, 25°C и 40°C (на примере модификации карбонатом натрия): а) гипсовый камень, модифицированный карбонатом натрия; б) магнезиальный камень, модифицированный карбонатом натрия

Ввиду особой опасности ионов свинца (вредное вещество 1-го класса опасности) и его негативного воздействия на состояние здоровье человека, в работе рассмотрена возможность санации грунтов от ионов свинца с помощью природных растворов ($S^{Mg_{II}}$ и морская вода с учетом солености Балтийского моря) с образованием труднорастворимого соединения, которое аналогично природному англезиту (таблица 6).

Таблица 6 – Результаты санации техногенно измененных дисперсных грунтов от ионов свинца природными растворами

| Концентрация ионов свинца | | |
|---|---|-----------------------|
| в водной вытяжке загрязненного грунта, моль/л | в водной вытяжке грунта после обработки природными растворами, моль/л | |
| | $S^{Mg_{II}}$ | Морская вода |
| $2 \cdot 10^{-3}$ | $1,2 \cdot 10^{-5}$ | $0,34 \cdot 10^{-3}$ |
| $2 \cdot 10^{-4}$ | $1,0 \cdot 10^{-6}$ | $1,0 \cdot 10^{-6}$ |
| $2 \cdot 10^{-5}$ | $< 1,0 \cdot 10^{-6}$ | $< 1,0 \cdot 10^{-6}$ |
| $2 \cdot 10^{-6}$ | $< 1,0 \cdot 10^{-6}$ | $< 1,0 \cdot 10^{-6}$ |

Глава 4 посвящена разработке, апробации и эколого-экономической оценке технологических решений с использованием обнаруженных обезвреживающих свойств магнезиального и гипсового камня при санации и рекультивации техногенно измененных дисперсных грунтов.

Технологическое решение (рисунок 3) для превентивной защиты основано на внесении магнезиального или гипсового камня в техногенно измененный дисперсный грунт.

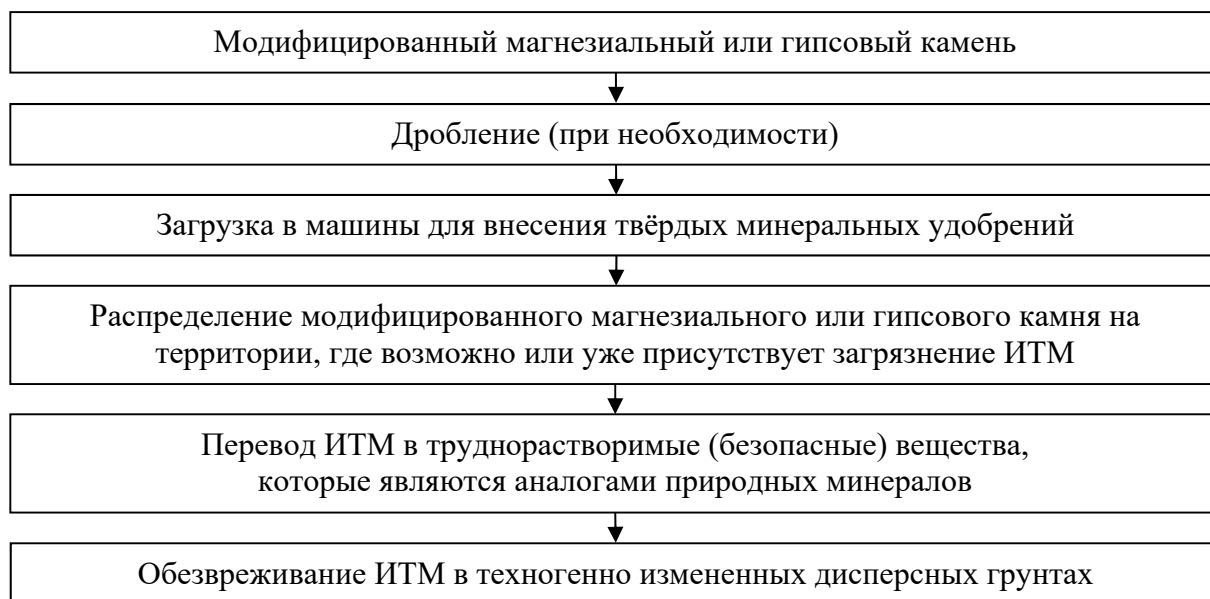


Рисунок 3 – Технологическое решение с использованием модифицированного магниального или гипсового камня

Доза магниального или гипсового камня (чистого или модифицированного), необходимая для снижения концентрации загрязнения ИТМ на 1 ПДК, может быть рассчитана по формуле 1:

$$m = \frac{\text{ПДК}_г \cdot m_г}{a}, \text{ г (для сыпучих сред)} \quad (1)$$

где m – масса магниального или гипсового камня (чистого или модифицированного), г;

$\text{ПДК}_г$ – предельно допустимая концентрация ИТМ в грунте, мг/кг;

$m_г$ – масса грунта, кг;

a – емкость магниального или гипсового камня, мг/г.

Формулы 1 является базовой, и значение массы m умножается на величину индекса ПДК, и общее значение массы магниального или гипсового камня определяется с учетом индекса ПДК, понимая под ним кратность превышения ПДК.

Для ликвидационной защиты от ионов свинца при санации и рекультивации предполагается внесение в техногенно измененный дисперсный грунт природных растворов способом орошения или инъектирования, осуществление которых возможно при помощи машин для внесения жидких удобрений (рисунок 4).

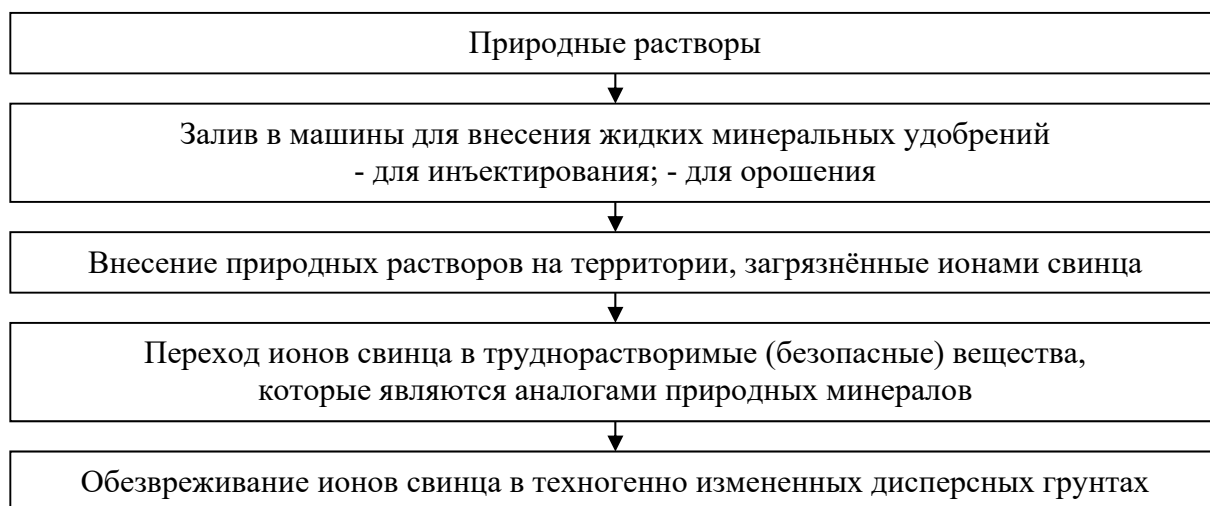


Рисунок 4 – Ликвидационное технологическое решение

Доза природного раствора для снижения на 1 ПДК по ионам свинца рассчитывается по формуле 2:

$$V = \frac{\text{ПДК}}{\text{МЭ}_{\text{св.}} \cdot \text{Н}}, \text{ л/кг} \quad (2)$$

где V – доза природного раствора, л;

ПДК – предельно допустимая концентрация ионов свинца, г/кг;

$\text{МЭ}_{\text{св.}}$ – моль эквивалентная масса ионов свинца, г/моль эквивалент;

Н – молярная концентрация эквивалентов природного раствора с учетом сульфат-анионов в растворе, моль эквивалент/л.

Формула 2 также является базовой, и значение объема V умножается на величину индекса ПДК.

По предложенным формулам был проведен расчет необходимой дозы магнезиального и гипсового камня, а также природных растворов. Опытно-промышленная апробация в насыпи земляного полотна автомобильной дороги и на территории строительной площадки показала, что в технологических решениях при санации и рекультивации техногенно измененных дисперсных грунтов можно использовать модифицированный магнезиальный или гипсовый камень и природные растворы, при этом ИТМ переходят в максимально безопасное состояние, образуя труднорастворимое соединение, подобное природному англезиту (таблица 7).

Таблица 7 – Результаты опытно-промышленной апробации

| Технологическое решение | Доза для снижения на 1 ПДК | | Результаты апробации | | |
|--|----------------------------|----------------------------|----------------------------------|-----------|--|
| | на 1 т грунта | на 1 м ² грунта | Концентрация ионов свинца, мг/кг | | ПДК ионов свинца по СанПиН 1.2.3685-21 |
| | | | исходн. | остаточн. | |
| для превентивной защиты | 0,2 - 4,7 кг | 0,05 - 1,2 кг | 50 | 5,0 | 6,0 |
| для ликвидационной защиты способом инъецирования | 12-20 л | 3-5 л | 50 | 5,0 | 6,0 |
| для ликвидационной защиты способом орошения | | | 50 | 5,0 | 6,0 |

Количественная и качественная оценка предложенных технологических решений проведена путем расчетов предотвращенного экологического ущерба и индекса PQ, разработанного и внедренного профессорами Сватовской Л.Б., Титовой Т.С., Бабак Н.А. (ПГУПС).

В таблице 8 представлены результаты расчета предотвращенного экологического ущерба по результатам апробации.

Таблица 8 – Предотвращенный экологический ущерб по предлагаемым технологическим решениям для обезвреживания ИТМ при санации и рекультивации техногенно измененных дисперсных грунтов

| Технологическое решение | Геоэкологический эффект | Предотвращенный экологический ущерб У, тыс. руб/год на 1 га |
|--|--|---|
| Превентивная защита | Обезвреживание ионов свинца гипсовым камнем | 2 328,85 |
| Ликвидационная защита способом инъецирования | Обезвреживание ионов свинца природной водой S ^{Mg-II} | 2 580,30 |
| | Обезвреживание ионов свинца морской водой | 2 539,18 |
| Ликвидационная защита способом орошения | Обезвреживание ионов свинца природной водой S ^{Mg-II} | 2 177,10 |
| | Обезвреживание ионов свинца морской водой | 2 135,85 |

Качественная оценка технологических решений проводилась по технологическому, геоэкозащитному, эксплуатационному и экономическому аспектам (таблица 9).

Таблица 9 – Данные по определению индексов PQ^n

| Технологические решения | Обозначение | Значение индекса PQ^n |
|--|-------------|-------------------------|
| Превентивное решение с использованием гипсового камня ($n = 1$) | PQ^1 | 0,975 |
| Ликвидационное решение с использованием инъектирования ($n = 2$) | PQ^2 | 0,883 |
| Ликвидационное решение с использованием орошения ($n = 3$) | PQ^3 | 0,883 |
| Утилизация техногенно измененного дисперсного грунта на полигоны ($n = 4$) | PQ^4 | 0,091 |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненных научных исследований заключаются в следующем:

1. Предложен критерий для геоэкологического обоснования использования искусственного магнезиального и гипсового камня при санации и рекультивации техногенно измененных дисперсных грунтов, заключающийся в том, что обезвреживание ИТМ должно осуществляться путем самопроизвольного образования труднорастворимых безопасных соединений, являющихся аналогами природных минералов.

2. Расчеты показали, что концентрация ИТМ (на примере ионов свинца) при выпадении осадка, ниже предельно допустимой концентрации, таким образом, процесс обезвреживания безопасен для техногенных грунтов.

3. Изменение изобарно-изотермического потенциала имеет отрицательное значение для процессов взаимодействия магнезиального или гипсового камня с ионами свинца, что обеспечивает самопроизвольность процесса обезвреживания. Более отрицательные значения изменения изобарно-изотермического потенциала в присутствии модификаторов прогнозируют возможность управления обезвреживающими свойствами магнезиального или гипсового камня.

4. Результаты расчета изменения изобарно-изотермического потенциала при различных температурах показывают, что значения изменения изобарно-изотермического потенциала на примере реакций взаимодействия магнезиального камня с ионами свинца и ионами кадмия существенно не меняются и являются отрицательными, что свидетельствует о самопроизвольности реакций обезвреживания.

5. Впервые установлено, что обезвреживание ионов свинца магнезиальным камнем сопровождается понижением изобарно-изотермического потенциала до $-38,5 \cdot 10^{-4}$ кДж/г, а емкость камня составляет 6 мг/г.

6. Впервые установлено, что введение модификаторов в магнезиальный и гипсовый камень при обезвреживании ИТМ сопровождается понижением изобарно-изотермического потенциала, емкость по отношению к ионам свинца достигает значений до 27,5 мг/г, по отношению к ионам меди, кадмия, марганца, железа и кобальта составляет от 12,5 до 27,9 мг/г.

7. Для управления обезвреживающими свойствами искусственного магнезиального и гипсового камня предложены два способа модификации: во-первых, при их изготовлении (до 15% от массы), во-вторых, путем пропитки готового образца. Модификация обуславливает увеличение емкости искусственного магнезиального и гипсового камня в 4 раза (до 27,5 мг/г).

8. Установлено, что температура окружающей среды существенно не влияет на емкость магнезиального и гипсового камня, их емкость увеличивается в зависимости дозы модификатора, и материалы не обладают селективностью, что обеспечивает одновременное обезвреживание различных ИТМ при санации и рекультивации техногенно измененных дисперсных грунтов.

9. Показано, что искусственный магнезиальный или гипсовый камень в присутствии модификатора может быть использован как геоиндикатор.

10. Подтверждена возможность использования природных минеральных растворов, а именно S^{MgII} и морской воды, для обезвреживания ионов свинца в жидкой среде и в техногенном дисперсном грунте.

11. Разработаны и апробированы способы санации техногенно измененных дисперсных грунтов от ионов свинца с использованием магнезиального и гипсового камня, а также природных растворов:

- На территории строительной площадки, принадлежащей ООО «Строительная компания «Выдрица», проведена опытно-промышленная апробация и получены акты по использованию природных растворов для обезвреживания ИТМ (на примере ионов свинца) в техногенно измененном дисперсном грунте. Остаточная концентрация загрязнителя составила 5,0 мг/кг;

- В насыпи земляного полотна автомобильной дороги на территории ООО «УМиАТ-98» проведена опытно-промышленная апробация и получен акт по использованию гипсового камня для обезвреживания ИТМ (на примере ионов свинца). Апробация показала снижение концентрации загрязнителя в 10 раз.

12. Разработаны формулы для расчета дозы искусственного магнезиального и гипсового камня, а также природных растворов при санации и рекультивации техногенных грунтов от ИТМ.

13. По апробированным способам проведена качественная и количественная оценка на основе расчёта индекса PQ и предотвращенного экологического ущерба. Значение индексов PQ^n предлагаемых способов, по сравнению с технологией утилизации техногенного грунта, выше на 90%; величина предотвращенного экологического ущерба составляет 2 580,30 тыс. руб/год на 1 га.

14. Практическая значимость и техническая новизна предлагаемых способов подтверждена пятью патентами на изобретения.

15. Материалы диссертации используются в учебном процессе ФГБОУ ВО ПГУПС при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 «Строительство».

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:

1. Рекомендовано при санации и рекультивации техногенно измененных дисперсных грунтов от ИТМ использовать модифицированный магнезиальный и гипсовый камень.

2. Рекомендовано использовать предложенные в диссертационной работе формулы для расчета необходимой дозы магнезиального и гипсового камня при санации и рекультивации техногенно измененных дисперсных грунтов от ИТМ.

3. В качестве одного из перспективных направлений дальнейших исследований несомненный интерес представляет исследование возможности использования магнезиального и гипсового камня для обезвреживания загрязнений органической природы.

4. Одним из перспективных направлений может быть исследование вопроса об использовании магнезиального и гипсового камня для обезвреживания ионов тяжелых металлов в фильтрате от полигонов твердых бытовых отходов.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук»:

1. Бобровник, А.Б. Геоэкозащитные свойства природных минералов, техногенных веществ и отходов / М.В. Шершнева, А.Б. Бобровник, А.В. Ключев // Естественные и технические науки. – 2015. – №4 (82). – С. 119-121.

2. Бобровник, А.Б. Расчет геоэкозащитных конструкций для почв и грунтов от некоторых загрязнений / М.В. Шершнева, Е.И. Макарова, А.В. Ключев, А.Б. Бобровник // Естественные и технические науки. – 2015. – №10 (88). – С. 254-256.

3. Бобровник, А.Б. Оценка качества минеральных поризованных систем с учетом геоэкозащитного, строительного и экономического аспектов /

М.В. Шершнева, Е.И. Макарова, А.В. Ключев, А.Б. Бобровник // Естественные и технические науки. – 2015. – №10 (88). – С. 249-253.

4. Бобровник, А.Б. Обнаружение геоэкозащитной ёмкости изделий сульфаткальциевой природы по отношению к ионам свинца / М.В. Шершнева, А.Б. Бобровник, А.В. Ключев // Естественные и технические науки. – 2016. – №6 (96). – С. 101-105.

5. Бобровник, А.Б. Применение гипсовых изделий как геоиндикаторов для мониторинга состояния биосферы / М.В. Шершнева, А.Б. Бобровник, А.В. Ключев // Естественные и технические науки. – 2016. – №11 (101). – С. 130-133.

6. Бобровник, А.Б. Расчет срока эксплуатации геоэкозащитного сооружения / М.В. Шершнева, А.Б. Бобровник, А.В. Ключев // Естественные и технические науки. – 2017. – №4 (106). – С. 92-94.

7. Бобровник, А.Б. Оценка минимизации негативного воздействия ионов свинца с использованием некоторых строительных средств и природных растворов / А.Б. Бобровник // Естественные и технические науки. – 2018. – №9 (123). – С. 64-66.

Научные статьи в журналах и изданиях, индексируемых наукометрическими базами цитирования Web of Science и Scopus:

8. Bobrovnik, A. V. Geoprotective Properties of Binders for Transport Systems / L.B. Svatovskaya, M.V. Shershneva, A.V. Bobrovnik // Procedia Engineering, 2017, 189, pp. 440-445.

9. Bobrovnik, A. V. Features of Geoprotective Properties' Manifestation of Some Silicate-containing Waste Products / M.V. Shershneva, V.A. Chernakov, A.V. Bobrovnik // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 272(2), 022025.

Свидетельства, патенты и другие виды интеллектуальной собственности, зарегистрированные в установленном порядке:

10. Патент N 2588233 Российская Федерация, МПК C02F 1/28 (2006.01). Способ очистки сточных вод от ионов металлов : N 2015126350/05 : заявл. 01.07.2015 : опубликовано 27.06.2016 / Сватовская Л. Б., Шершнева М. В., Ефимова Н. Н., Бобровник А. Б. ; заявитель ФГБОУ ВПО ПГУПС. – 4 с. : ил. – Текст : непосредственный.

11. Патент N 2683835 Российская Федерация, МПК C02F 1/62 (2006.01), C02F 1/28 (2006.01), B01J 20/04 (2006.01), B01J 20/282 (2006.01), C02F 101/20 (2006.01), C02F 103/16 (2006.01). Способ очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов : N 2018129052 : заявл. 07.08.2018 : опубликовано 02.04.2019 / Сватовская Л. Б., Шершнева М. В., Бобровник А. Б. ; заявитель ФГБОУ ВО ПГУПС. – 4 с. : ил. – Текст : непосредственный.

12. Патент N 2700072 Российская Федерация, МПК C02F 1/28 (2006.01), C02F 1/42 (2006.01), B01J 20/28 (2006.01). Способ очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов : N 2018104015 : заявл. 01.02.2018 : опубликовано : 12.09.2019 / Сватовская Л. Б., Шершнева М. В., Бобровник

А. Б., Абу-Хасан М., Русанова Е. В. ; заявитель ФГБОУ ВО ПГУПС. – 4 с. : ил. – Текст : непосредственный.

13. Патент N 2686228 Российская Федерация, МПК C02F 1/28 (2006.01), C02F 1/62 (2006.01), B01J 20/04 (2006.01), C02F 101/20 (2006.01), C02F 103/16 (2006.01). Способ очистки сточных вод от ионов металлов : N 2018104003 : заявл. 01.02.2018 : опубликовано : 24.04.2019 / Сватовская Л. Б., Шершнева М. В., Бобровник А. Б., Абу-Хасан М., Русанова Е. В. ; заявитель ФГБОУ ВО ПГУПС. – 4 с. : ил. – Текст : непосредственный.

14. Патент N 2685673 Российская Федерация, МПК C02F 1/62 (2006.01), C02F 1/28 (2006.01), B01J 20/04 (2006.01), B01J 20/282 (2006.01), C02F 101/20 (2006.01), C02F 103/16 (2006.01). Способ очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов : N 2018129048 : заявл. 07.08.2018 : опубликовано : 22.04.2019 / Сватовская Л. Б., Шершнева М. В., Бобровник А. Б. ; заявитель ФГБОУ ВО ПГУПС. – 4 с. : ил. – Текст : непосредственный.

Статьи, опубликованные в других научных журналах и изданиях:

15. Бобровник, А.Б. Геоэкозащита почвогрунтов от разливов нефтепродуктов с использованием тяжелого бетона / М.В. Шершнева, А.Б. Бобровник, Д.П. Мандрица // В сборнике: Инновационные технологии в строительстве и геоэкологии. Материалы II Международной научно-практической конференции. Петербургский государственный университет путей сообщения имени императора Александра I, Кафедра «Инженерная химия и естествознание». – 2015. – С. 85-87.

16. Бобровник, А.Б. Исследования геоэкозащитной активности веществ сульфатоалюминатной природы по отношению к ионам тяжелых металлов / М.В. Шершнева, А.Б. Бобровник, Н.Н. Ефимова, А.В. Клюев // В сборнике: Геоэкохимия защиты литосферы. Материалы I Международной научно-практической интернет-конференции. – 2015. – С. 42-44.

17. Бобровник, А.Б. Превентивные и ликвидационные методы в технологических решениях строительной деятельности для геоэкозащиты от некоторых органических загрязнений с использованием строительных систем / М.В. Шершнева, М.Ю. Савельева, Н.Н. Ефимова, А.Б. Бобровник, А.В. Клюев, Д.П. Мандрица // В сборнике: Современные направления развития технологии, организации и экономики строительства. – 2015. – С. 142-144.

18. Бобровник, А.Б. Расчет предотвращенного экологического ущерба в геоэкозащитных технологиях / М.В. Шершнева, А.Б. Бобровник, А.В. Клюев, М.Ю. Савельева // Актуальные вопросы науки. Материалы XXV Международной научно-практической конференции. – 2016. – С. 149-151.

19. Бобровник, А.Б. Исследование геоэкозащитных свойств изделий сульфат-кальциевой природы по отношению к ионам тяжелых металлов / М.В. Шершнева, А.Б. Бобровник, А.В. Клюев // В сборнике: Геоэкохимия

защиты литосферы. Материалы II Международной научно-практической интернет-конференции. – 2016. – С. 37-40.

20. Бобровник, А.Б. Геоэкозащитные свойства сульфатно-кальциевых изделий по отношению к ионам свинца / Л.Б. Сватовская, М.В. Шершнева, А.Б. Бобровник // Транспортное строительство. – 2017. – № 5. – С. 28-30.

21. Бобровник, А.Б. Исследование возможности анионирования для очистки почв и грунтов от ионов свинца / А.Б. Бобровник // В сборнике: Геоэкохимия защиты литосферы. Материалы III Международной научно-практической интернет-конференции. – 2017. – С. 42-46.

22. Бобровник, А.Б. Геоэкозащитная емкость материалов для строительных конструкций или сооружений при защите почв от загрязнения / М.В. Шершнева, А.Б. Бобровник // В сборнике: Инновационные технологии в строительстве и геоэкологии. Материалы IV Международной научно-практической интернет-конференции. – 2017. – С. 41-44.

23. Бобровник, А.Б. Определение поглотительных свойств тяжелых бетонов по отношению к органическим загрязнителям / М.В. Шершнева, А.Б. Бобровник // В сборнике: Геоэкохимия защиты литосферы. Материалы III Международной научно-практической интернет-конференции. – 2017. – С. 33-36.

24. Бобровник, А.Б. Метод оценки геоэкозащитных свойств систем при изучении дисциплин геоэкологии / Л.Б. Сватовская, М.В. Шершнева, А.Б. Бобровник // В сборнике: Профессиональное образование, наука и инновации в XXI веке. Сборник трудов XI Санкт-Петербургского конгресса. – 2017. – С. 250-251.

25. Бобровник, А.Б. Свинцовое загрязнение окружающей среды и пути решения проблемы / А.Б. Бобровник, М.В. Шершнева // В сборнике: ТРАНСПОРТ: ПРОБЛЕМЫ, ИДЕИ, ПЕРСПЕКТИВЫ. Сборник трудов LXXVII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2017. – С. 23-27.

26. Бобровник, А.Б. Геоэкозащитные технологические решения по минимизации загрязнений ионами свинца в транспортном строительстве / Л.Б. Сватовская, М.В. Шершнева, А.Б. Бобровник // Транспортное строительство. – 2018. – № 8. – С. 16-18.

27. Бобровник, А.Б. Геоэкозащитная детоксикация ионов свинца минеральными строительными материалами / Л.Б. Сватовская, М.В. Шершнева, А.Б. Бобровник // Транспортное строительство. – 2018. – № 7. – С. 24-28.

28. Бобровник, А.Б. Термодинамическое обоснование прогнозирования детоксикационных свойств минеральных строительных изделий сульфатокальциевой и магниевой природы / М.В. Шершнева, А.Б. Бобровник // В сборнике: Геоэкохимия защиты литосферы.

Материалы IV Международной научно-практической интернет-конференции. – 2018. – С. 30-33.

29. Бобровник, А.Б. Расчет количества минерального геоантидота для минимизации негативного воздействия ионов тяжелых металлов на геосистемы / М.В. Шершнева, А.Б. Бобровник // В сборнике: Геоэкохимия защиты литосферы. Материалы IV Международной научно-практической интернет-конференции. – 2018. – С. 27-29.

30. Бобровник, А.Б. Расчет необходимого количества геоэкозащитных природных растворов при ликвидации загрязнений с учетом химических знаний / М.В. Шершнева, А.Б. Бобровник // В сборнике: Геоэкохимия защиты литосферы. Материалы IV Международной научно-практической интернет-конференции. – 2018. – С. 23-26.

31. Бобровник, А.Б. Применение минеральных отходов различной природы для обеззараживания фильтрата полигонов твердых бытовых отходов / М.В. Шершнева, А.Б. Бобровник // В книге: Перспективы будущего в образовательном процессе: сборник тезисов Национальной научно-технической конференции. – 2018. – С.227-229.

32. Бобровник, А.Б. Превентивная инновационная технология защиты геосистем от ионов свинца с использованием строительных изделий / М.В. Шершнева, А.Б. Бобровник // В сборнике: Инновационные технологии в строительстве и геоэкологии. Материалы конференции. – 2018. – С. 20-23.

33. Бобровник, А.Б. Инновационная ликвидационная технология очистки геосистем от ионов свинца с использованием природных растворов / М.В. Шершнева, А.Б. Бобровник // В сборнике: Инновационные технологии в строительстве и геоэкологии. Материалы конференции. – 2018. – С. 17-19.

34. Бобровник, А.Б. Геоэкозащитные свойства веществ на основе некоторых строительных материалов / А.Б. Бобровник, М.В. Шершнева, Н.А. Бабак, Н.А. Шредник // Экология урбанизированных территорий. – 2019. – № 3. – С. 77-80.

35. Бобровник, А.Б. Технологические решения по минимизации негативного воздействия ионов тяжелых металлов в фильтрате полигонов твердых бытовых отходов / Н.А. Шредник, М.В. Шершнева, Н.А. Бабак, А.Б. Бобровник // Проблемы региональной экологии. – 2019. – № 5. – С. 85-88.

36. Бобровник, А.Б. К вопросу об обезвреживании ионов свинца / А.Б. Бобровник, М.В. Шершнева, Н.А. Бабак, Н.А. Шредник // Проблемы региональной экологии. – 2019. – № 4. – С. 92-95.

37. Бобровник, А.Б. Применение природных растворов для обезвреживания ионов свинца в придорожной полосе автомагистрали / А.Б. Бобровник // Мир дорог. – 2020. – № 129-130. – С. 102-104.

38. Бобровник, А.Б. Термодинамический прогноз нейтрализации ионов тяжелых металлов сульфатными системами в условиях изменения температуры окружающей среды / М.В. Шершнева, А.Б. Бобровник // Естественные и технические науки. – 2020. – №9 (147). – С. 54-56.
39. Бобровник, А.Б. Обезвреживание техногенных грунтов с использованием природных растворов / М.В. Шершнева, А.Б. Бобровник // Естественные и технические науки. – 2020. – №9 (147). – С. 51-53.
40. Бобровник, А.Б. Минимизация негативного воздействия ионов свинца на геосреду с использованием строительных систем / М.В. Шершнева, А.Б. Бобровник // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2020. – № 9 (1033). – С. 60-61.
41. Бобровник, А.Б. Оценка возможности обезвреживания ионов тяжелых металлов в нестандартных условиях / М.В. Шершнева, А.Б. Бобровник // В сборнике: Геоэкохимия защиты литосферы. – 2020. – С. 20-23.
42. Бобровник, А.Б. Применение рентгенофлуоресцентного метода для исследования геоэкозащитных свойств магнезиального камня / М.В. Шершнева, А.Б. Бобровник // В сборнике: Геоэкохимия защиты литосферы. – 2020. – С. 16-19.
43. Бобровник, А.Б. Исследования содержания свинца в техногенном грунте в условиях пониженного значения рН / М.В. Шершнева, А.Б. Бобровник // В сборнике: Геоэкохимия защиты литосферы. – 2020. – С. 12-15.
44. Бобровник, А.Б. Применение природных растворов для обезвреживания ионов свинца / М.В. Шершнева, А.Б. Бобровник // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2020. – Т. 17. – Вып. 2. – С. 263-268.
45. Бобровник, А.Б. Качественная и количественная оценка минимизации негативного воздействия ионов свинца на геосистемы / А.Б. Бобровник, М.Ю. Слесарев, М.В. Шершнева // Естественные и технические науки. – 2021. – № 6 (157). – С. 50-52.
46. Бобровник, А.Б. Химическое загрязнение техногенных грунтов г. Санкт-Петербурга / М.В. Шершнева, А.Б. Бобровник // В сборнике: Геоэкохимия защиты литосферы. Материалы VII Международной научно-практической интернет-конференции. – 2021. – С. 57-61.
47. Бобровник, А.Б. Технологические решения по снижению химического загрязнения техногенных грунтов некоторыми строительными отходами / М.В. Шершнева, А.Б. Бобровник // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2021. – № 9 (1045). – С. 52-53.

Учебные пособия:

48. Бобровник, А.Б. Химия и микробиология воды: учебное пособие / М.В. Шершнева, М.М. Байдарашвили, А.Б. Бобровник. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2017. – 63 с.