

Получение потенциально плодородного грунта при реабилитации объектов накопленного вреда окружающей среде

© 2025. А. В. Кошелев¹, к. т. н., с. н. с.,
Е. И. Тихомирова², д. б. н., зав. кафедрой,
О. В. Атаманова², д. т. н., профессор,
В. Ф. Головков¹, д. т. н., профессор,

¹Государственный научно-исследовательский институт органической химии и технологии,
111024, Россия, г. Москва, ш. Энтузиастов, д. 23,

²Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.,
410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77,
e-mail: tichomirova_ei@mail.ru

Целью данной работы являлась разработка концепции реабилитации объектов накопленного вреда окружающей среде, основанной на переводе нарушенных и загрязнённых земель, а также отходов в потенциально плодородный грунт (ППГ) по инновационной технологии, учитывающей гранулометрический состав, химическое загрязнение, ёмкость катионного обмена (ЕКО), наличие гумуса и безопасность (V класс опасности) получаемого субстрата. Технология получения условно плодородных грунтов рассмотрена на примере модельной задачи перевода инертного крупнодисперсного отхода V класса опасности в ППГ, пригодный для рекультивации. Реализованные экспериментальные исследования показали, что в качестве мелиоранта особый интерес представляет буровой шлам (БШ), являющийся крупнотоннажным отходом производства. Полученная комплексная композиция БШ + песок отвечает требованиям, которые предъявляются к ППГ, и обеспечивает достаточный уровень ЕКО грунта – 17 мг-экв./100 г. Исследованы изменения фитотоксичности почвы в зависимости от дозы внесения рекультиванта и времени. Резкое снижение уровня фитотоксичности достигалось при дозе внесения рекультиванта 0,8 кг/м². Исследованы образцы техногенного грунта с исходным содержанием свинца, цинка и меди. Извлечение свинца, меди и цинка методом динамического выщелачивания составило от 80 до 95%, что доказывает перспективность предложенного метода очистки грунта.

Ключевые слова: объект накопленного вреда окружающей среде, методология, реабилитация, рекультивация, гуминовые препараты, бентонит, глауконит.

Potentially fertile soil obtaining during the rehabilitation of accumulated environmental damage sites

© 2025. A. V. Koshelev¹ ORCID: 0000-0002-1623-734X[†]
E. I. Tichomirova² ORCID: 0000-0001-6030-7344[†]
O. V. Atamanova² ORCID: 0000-0002-3220-031X[†]
V. F. Golovkov¹ ORCID: 0009-0000-5293-1286[†]

¹State Research Institute of Organic Chemistry and Technology,
23, Entuziastov Highway, Moscow, Russia, 111024,

²Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,
77, Politekhnikeskaya St., Saratov, Russia, 410054,
e-mail: tichomirova_ei@mail.ru

This article examines a methodology for the rehabilitation of accumulated environmental damage sites (AEDS), based on the conversion of disturbed and contaminated lands into potentially fertile soils using bulk waste (overburden, decontaminated soils, drill cuttings, oil-contaminated soils, and landfill soils) in combination with various technological methods, including thermal decontamination, leaching, and treatment with humic preparations and natural adsorbents. The main conceptual principles of this methodology are based on a combination of organizational and technical techniques (methods). These techniques enable the conversion of disturbed and contaminated lands into potentially fertile soils, and the conversion of waste into secondary raw materials. The objective of this study was to develop a concept for the rehabilitation of AEDS based on the conversion of disturbed and contaminated lands, as well as waste, into potentially fertile soil (PFS) using an innovative technology that takes into account the particle size distribution, chemical contamination, cation exchange capacity, humus content, and the safety (hazard class 5) of the resulting substrate. The

technology for producing conditionally fertile soils was examined using the example of a model problem of converting inert coarse waste of hazard class 5 into potentially fertile soil suitable for reclamation. The experimental studies showed that drill cuttings, a large-tonnage industrial waste, are of particular interest as an ameliorant. The resulting complex composition of humic-mineral ameliorant and sand meets the requirements for PFS, as drill cuttings provided 40% of the fine fraction, the humic preparation met the humification standard, and together, the humic preparation and drill cuttings provided a sufficient cation exchange capacity of the soil – 17 mg-eq/100 g. Changes in soil phytotoxicity were studied depending on the reclamation dose and time. A sharp reduction in phytotoxicity was achieved with a reclamation dose of 0.8 kg/m². Samples of man-made soil with initial lead, zinc, and copper contents were studied. The extraction of lead, copper, and zinc by dynamic leaching ranged from 80 to 95%, demonstrating the potential of the proposed soil remediation method.

Keywords: accumulated environmental damage site, methodology, rehabilitation, reclamation, humic preparations, bentonite, glauconite.

Проблема ликвидации объектов накопленного вреда окружающей среде (ОНВОС) в настоящее время является важной для урбанизированных центров Российской Федерации. При этом особую значимость приобретают вопросы, связанные с обезвреживанием и утилизацией отходов производства и потребления, о чём свидетельствует принятие нормативных документов: ГОСТ Р 54003-2010, Федеральный закон «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 № 7-ФЗ, Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и др. Согласно Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года общее количество накопленных в России к настоящему времени отходов составляет более 30 млрд т.

В настоящее время по инициативе Министерства торговли и промышленности РФ разрабатывается инженерно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям «Ликвидация объектов накопленного вреда окружающей среде» ИТС 53-2025 [1]. В справочнике широко представлены различные технологии обезвреживания отходов на территории ОНВОС, но отсутствуют методы получения потенциально плодородного грунта (ППГ) из обезвреженных субстратов. К сожалению, до настоящего времени не разработана научная и методологическая база перевода обезвреживаемых отходов и загрязнённых земель в ППГ, который можно использовать для рекультивации территории ликвидируемых ОНВОС. Использовать привозной грунт на рекультивируемых территориях чаще всего неоправданно дорого. Например, затраты на рекультивацию ликвидируемого предприятия ГУП РК «Сакский химический завод» (Республика Крым) рассчитаны в соответствии с нормативами РФ проектной организацией ООО НПФ «Экоцентр МТЭА» (г. Москва) при проведении комплексного экологического аудита в 2016 г. [2]. По результатам инженерно-экологических изысканий объём

загрязнённого грунта и строительных отходов, которые необходимо вывезти на полигоны захоронения в соответствии с нормативными требованиями (СанПиН 1.2.3685-21), определены в размерах 52040 и 485637 м³, соответственно. Для выполнения рекультивационных работ на освобождённой от загрязнённого грунта и строительных отходов территории предприятия необходимо завезти 127 980 м³ плодородных почв.

В настоящей работе предложена концепция реабилитации ОНВОС, которая основывается на использовании научно-обоснованных методов, способов и технологий обезвреживания крупнотоннажных отходов и загрязнённых земель с их последующей совместной утилизацией методом перевода в ППГ, содержащий, при необходимости, алюмосиликатные сорбционные материалы и гуминовые препараты. Потенциально плодородный грунт позволяет использовать его при рекультивации ОНВОС [3]. Полученный на территории ОНВОС ППГ позволяет экономить значительные средства и ресурсы на завоз почвы со стороны. Например, на рекультивацию 1 га ОНВОС требуется минимум 3 тыс. т почвы (грузоподъёмность одного железнодорожного состава) для формирования плодородного слоя толщиной 0,2–0,3 м под посадку травянистых культур.

Для создания ППГ необходимо было сформулировать требования к ним. Таким образом, к ППГ предъявляются следующие требования, выделенные в пять групп (факторов), в соответствии с ГОСТ 17.5.1.03-86 и ГОСТ Р 57446-2017.

1. Гранулометрический состав. Характеризует допустимый диапазон размеров твёрдых частиц в грунте. Определяется от суммы фракций. Норматив: дисперсии размером менее 0,01 мм должны составлять более 10%, а дисперсии размером более 3 мм – менее 10%.

2. Химическое загрязнение грунта. Загрязнённость грунта характеризуется по

перечню определяемых веществ и элементов относительно их предельно-допустимой концентрации (ПДК). Дополнительно определяется содержание водной вытяжки по её сухому остатку. Норма – не более 1%.

3. Ёмкость катионного обмена (ЕКО). Норматив – не менее 15 мг-экв/100 г.

4. Наличие гумуса. Норматив – более 0 для ППГ.

5. Класс опасности. Норматив – V класс.

Ранее [4, 5] были рассмотрены характеристики следующих отходов и загрязнённых земель: вскрышные и вмещающие породы (ВВП) и песок (П), используемый для отсыпок производственных площадок; загрязнённые тяжёлыми металлами (ТМП) и полихлорированными бифенилами (ПХБП) почвы; нефтезагрязнённые грунты (НГ); загрязнённый пестицидами грунт (ПГ) с временных мест хранения; отходы бурения – буровой шлам (БШ); свалочный грунт (СГ), выделяемый из «тела» полигона твёрдых коммунальных отходов. Соответствие (+) или несоответствие (–) параметрам (факторам) ППГ перечисленных выше отходов и загрязнённых земель показано в таблице 1.

Основными вариантами обезвреживания отходов и загрязнённых земель, применяемыми в настоящее время, являются: термообез-

вреживание, выщелачивание, фиторемедиация [5–9].

Термообезвреживание (ТО) – высокопроизводительный способ очистки от органических загрязнителей. Этот способ подробно рассмотрен в работе [10], посвящённой обезвреживанию грунта и строительных материалов, загрязнённых хлорсодержащими соединениями и тяжёлыми металлами. Для загрязнённого пестицидами грунта (ПГ) определена минимальная температура – 750 °С, при которой отход обезвреживается до пятого класса опасности. Рассматриваемый ПГ переходит в инертный грунт, аналогичный вскрышным породам и песку. Термообезвреживанием можно получить инертный грунт пятого класса опасности из ПХБП, НГ и СГ. При этом полученный инертный грунт будет соответствовать по критериям ППГ песку и вскрышным породам, то есть положительными будут только два фактора – Ф2 и Ф5 (табл. 2).

Необходимо отметить, что термообезвреживание отходов, представленных в таблице 2, сопровождается ухудшением других параметров (факторов), характеризующих ППГ, – гранулометрического состава, ЕКО, наличия гумуса. Это вызвано окислением органических веществ почв до диоксида углерода и воды, а также разрушением сложной структуры

Таблица 1 / Table 1

Характеристики отходов и загрязнённых земель по критериям потенциально плодородного грунта (ППГ) / Characteristics of waste and contaminated soils according to criteria of potentially fertile soil

Загрязнённые земли, отходы* Contaminated soil, waste*	Фактор (Ф) ППГ / Potentially fertile soil factor (F)				
	Ф1 F1	Ф2 F2	Ф3 F3	Ф4 F4	Ф5 (класс опасности) F5 (hazard class)
ВВП / OHR	–	+	–	–	+(V)
П / S	–	+	–	–	+(V)
ТМП / HMS	+	–	+	+	–(IV)
НГ / OS	+	–	+	+	–(IV)
ПХБП / PCNBP	+	–	+	+	–(III-IV)
БШ / DC	+	–	+	–	–(IV)
СГ / LS	–	–	+	–	–(III-IV)
ПГ / PS	–	–	–	–	–(II-IV)

Примечание к таблицам 1 и 2 / Note to Table 1 and 2: *пояснение см. в тексте / see the text for an explanation.

Таблица 2 / Table 2

Характеристики отходов и загрязнённых земель после термообезвреживания
Characteristics of waste and contaminated soils after thermal neutralization

Грунт (отход) Soil (waste)	Фактор (Ф) ППГ / Potentially fertile soil factor (F)				
	Ф1 / F1	Ф2 / F2	Ф3 / F3	Ф4 / F4	Ф5 / F5
НГ / OS	–	+	–	–	+
ПХБП / PCNBP	–	+	–	–	+
СГ / LS	–	+	–	–	+
ПГ / PS	–	+	–	–	+

глин, агрегированием (сплавлением) мелких частиц при повышенной температуре.

Целью работы являлась разработка концепции реабилитации объектов ОНВОС, основанной на переводе нарушенных и загрязнённых земель, а также отходов в ППГ по инновационной технологии, учитывающей гранулометрический состав, химическое загрязнение, ёмкость катионного обмена, наличие гумуса и безопасность (пятый класс опасности) получаемого субстрата.

Объекты и методы исследования

Объекты исследований представляли собой гидроалюмосиликаты нескольких месторождений: Саригюхского (Армения), Даш-Салахлинского (Азербайджан), а также глаукониты, добываемые на территориях Саратовской, Тамбовской и Челябинской областей Российской Федерации. Другими объектами исследований являлись БШ с пяти шламовых амбаров Самарской области, образцы гуминовых препаратов (ГП), произведённых на предприятии ООО НПФ «Прогрессивные технологии» (г. Саратов).

Лабораторные испытания образцов бентонитов, глауконитов, а также гуминовых препаратов выполняли на базе Испытательного лабораторного центра «ЭкоОС» в Саратовском государственном техническом университете имени Гагарина Ю.А. Измерение концентраций показателей в образцах указанных материалов выполняли методом энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного анализа с использованием спектрометра EDX – 700/8000 Shimadzu (Япония). Для определения размеров частиц исходных образцов материалов применяли лазерный дифракционный анализатор Shimadzu SALD-2201. Размеры частиц исследуемых материалов, диспергируемых в воде, и их электрокинетические потенциалы определяли при помощи высокоэффективного двухуглового анализатора размеров частиц Marven Zetasizer Nano ZS (Великобритания). При этом размеры частиц определяли в диапазоне 0,6–6,0 мкм. Класс опасности отхода устанавливали на основании требований Приказа Минприроды России от 08.12.2020 № 1027.

Солесодержание в водном растворе определяли методом кондуктометрии с использованием кондуктометра AD 203 (Россия).

Для определения ЕКО руководствовались ГОСТ 17.4.4.01-84. Биологическую активность грунта устанавливали в соответствии с ГОСТ 13038-84.

Биологический тест-объект представлял собой семена пшеницы Тулайковская 10 (Самарский НИИ сельского хозяйства). Для проращивания семян использовали растительни, а контрольная среда представляла собой песок фракции 0,4–0,8 мм влажностью 60%. Результаты анализа обоснованных выборок были получены с использованием статистической обработки данных.

При выполнении экспериментальных исследований особое внимание уделялось процессу выщелачивания поллютантов раствором азотной кислоты.

Для удаления из грунта ионов тяжёлых металлов – меди, цинка и свинца предложена промывка (выщелачивание) разбавленным раствором азотной кислоты. Образцы грунта взяты на территории прекратившего свою деятельность предприятия. Выбор азотной кислоты определён хорошей растворимостью нитратов меди, цинка и свинца в воде. Основной целью экспериментальной работы являлся поиск минимальной концентрации азотной кислоты в воде, которая может быть использована в качестве раствора-выщелачивателя.

Статический метод выщелачивания заключался в размещении образца загрязнённого грунта массой 10 г в стеклянной плоскодонной колбе объёмом 250 мл со 100 мл выщелачивателя (раствор азотной кислоты

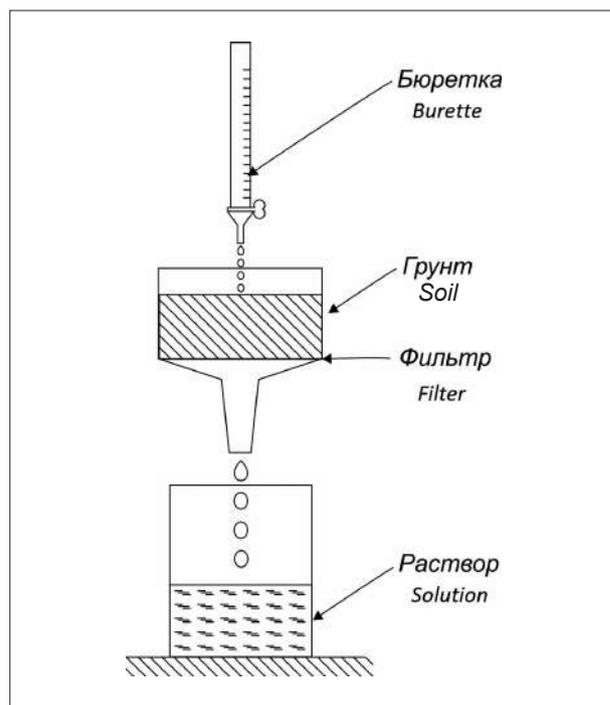


Рис. 1. Схема экспериментальной установка для очистки грунта динамическим выщелачиванием
Fig. 1. Schematic diagram of an experimental setup for soil purification by dynamic leaching

различной концентрации) на 24 ч с периодическим (раз в 1 ч) перемешиванием.

При динамическом методе выщелачиватель объёмом 2–4 л пропускали через образец загрязнённого грунта объёмом 200 мл, помещённого в воронку Бюхнера (рис. 1), со скоростью 10–20 мл/мин.

Результаты и обсуждение

Авторами статьи была предложена технология получения ППГ.

Предлагаемую технологию получения ППГ рассмотрим на примере модельной задачи перевода инертного крупнодисперсного отхода V класса опасности в ППГ, пригодный для рекультивации. К такого рода отходам относятся вскрышные породы и термообработанный грунт. Похожая задача возникает при рекультивации песчаных отсыпок технологических площадок добычи углеводородов в Арктической зоне. Алгоритм решения задачи схематично представлен на рисунке 2. Предлагаемая технология включает следующие процедуры:

1. Отбор при помощи отсева или грохочения из исходного грунта фракции с размером частиц мельче 30 мм. Установление требуемого

количества мелкодисперсного вещества (глины) для его внесения в грунт.

2. Смешивание мелкодисперсного вещества (глины) с грунтом.

3. Отсеянные фракции грунта крупнее 30 мм возвращаются назад к исходной процедуре.

4. Подача дозатором мелкодисперсной фракции глины. Выполняется одновременно с процедурой 2.

5. Поступление подготовленного и перемешанного грунта в ёмкость для добавления гумуса.

6. Подача при помощи дозатора гумуса в ёмкость с грунтом. Гуминовые препараты добавляются в количестве, соответствующем ёмкости обмена.

7. Заключительной процедурой является транспортировка и выгрузка ППГ на объект.

Для реализации предложенной технологии необходимо было изучить способы повышения ЕКО и нормализации гранулометрического состава.

В таблице 3 представлены данные по ЕКО различных типов грунтов и гуминовых веществ, отхода буровых работ – БШ, а также минералов – бентонита и глауконита [11, 12]. Выбор глауконита и бентонита в качестве мелиорантов определяется их высокой катио-

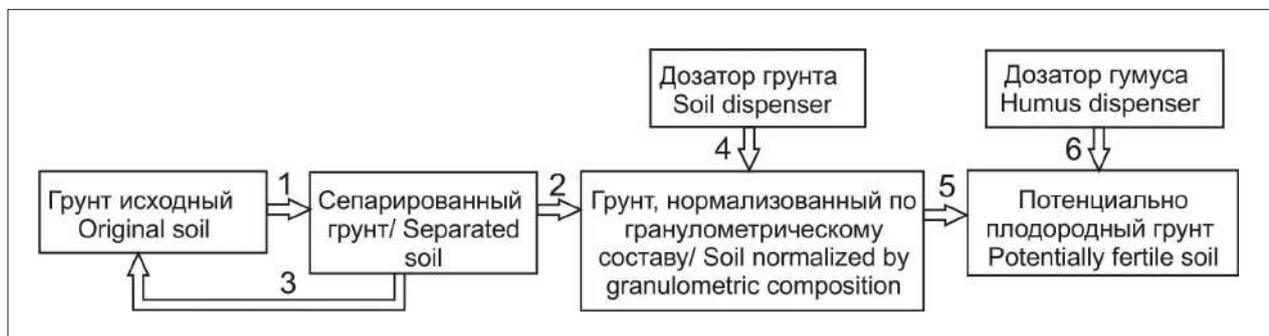


Рис. 2. Технология производства потенциально плодородного грунта (пояснения см. в тексте)

Fig. 2. Technology for producing potentially fertile soil (see text for explanation)

Таблица 3 / Table 3

Катионообменные ёмкости некоторых почв, минералов и гуминовых веществ
Cation exchange capacities of some soils, minerals and humic substances

Тип мелиоранта Meliorant type	Мелиорант / Meliorant	ЕКО, мг-экв/100 г Cation exchange capacity, mg-eq/100 g
Алюмосиликаты Aluminosilicates	Песчаный грунт / Sandy soil	1–5
	Глауконит / Glaucosite	до 50 / up to 50
	Бентонит / Bentonite	до 150 / up to 150
	Буровой шлам / Drill cuttings	до 100 / up to 100
Гуминовые вещества Humic substances	Чернозём / Black soil	20–60
	Гумус почв / Soil humus	40–300
	Гуминовые кислоты / Humic acids	до 900 / up to 900
	Фульвокислоты / Fulvic acids	до 700 / up to 700

Таблица 4 / Table 4

Размер частиц и величина электрокинетического потенциала (ЭКП) минералов, гуминовых препаратов и бурового шлама / Particle size and electrokinetic potential of minerals, humic preparations and drill cuttings

Наименование Name	Размер, мкм Size, μm	Значение ЭКП, мВ Electrokinetic potential value, mV
Глауконит / Glaucosite	1,6	-27
Гуминовые препараты Humic preparations	0,2	-35
Бентонит / Bentonite	0,6	-32
Буровой шлам / Drill cuttings	0,9	-19

Таблица 5 / Table 5

Класс опасности композиций буровой шлам+песок (БШ+П) и минерализация водной вытяжки
Hazard class of drill cuttings + sand (DC+S) compositions and mineralization of water extract

Образец Sample	Кратность разведения вытяжки Extract dilution ratio	Минерализация, мг/дм ³ Mineralization, mg/dm ³	Класс опасности Hazard class
Песок / Sand	1	6	V
БШ + 100% П DC + 100% S	4	749	IV
БШ + 200% П DC + 200% S	2	1144	IV
БШ + 500% П DC + 500% S	1	1107	IV
БШ + 1500% П DC + 1500% S	1	687	V

нообменной ёмкостью, малой дисперсностью и развитой поверхностью алюмосиликатов, значительной величиной электрокинетического потенциала коллоидных частиц в воде. Основным компонентом БШ является бентонит, поэтому этот крупнотоннажный отход может использоваться в качестве мелиоранта.

Определение размеров и электрокинетического потенциала коллоидных частиц глауконита, бентонита, гуминовых препаратов и БШ в водной среде выполнены электрофоретическим методом. Наименьшие размеры коллоидных частиц и наибольшее значение электрокинетического потенциала (ЭКП) получены у гуминовых препаратов (табл. 3), что предопределяет их высокую проникающую способность и активное взаимодействие с дисперсиями грунта (табл. 4).

Из данных таблиц 3 и 4 следует, что в качестве мелиоранта особый интерес представляет БШ, который является крупнотоннажным отходом производства [13, 14]. Размер коллоидных частиц БШ крупнее, а дзета-потенциал меньше, чем у бентонита, за счёт сложного состава субстрата, включающего в себя, кроме бентонита, мелкодисперсную выбуренную породу и различные модифицирующие добавки.

Совместная утилизация инертного грунта и бурового шлама. Авторами статьи были выполнены эксперименты по определению класса опасности композиций БШ с песком (П) в соотношении от 1:1 до 1:15 по методикам измерений ФР.1.39.2007.03223 и ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.12-06, Т 16.1:2:2.3:3.9-06. Дополнительно находили уровень минерализации водной вытяжки при соотношении субстрат:вода=1:10. В таблице 5 представлены полученные данные. Необходимо отметить, что только композиция БШ:песок в соотношении не менее 1:10 имеет пятый класс опасности, что позволяет использовать её для получения ППГ.

Полученная комплексная композиция гуминоминеральный мелиорант + песок отвечает требованиям, которые предъявляются к ППГ, так как БШ обеспечил 10% мелкодисперсной фракции, ГП позволил выполнить норматив по гумусированию, а вместе ГП и БШ обеспечили достаточный уровень ЕКО грунта – 17 мг-экв./100 г. Схематично технологический процесс представлен на рисунке 3. Первая технологическая операция – изъятие из амбара БШ и получение композиции БШ+10 П путём равномерного распределения шлама по рассчитанной площади. Вторая операция –

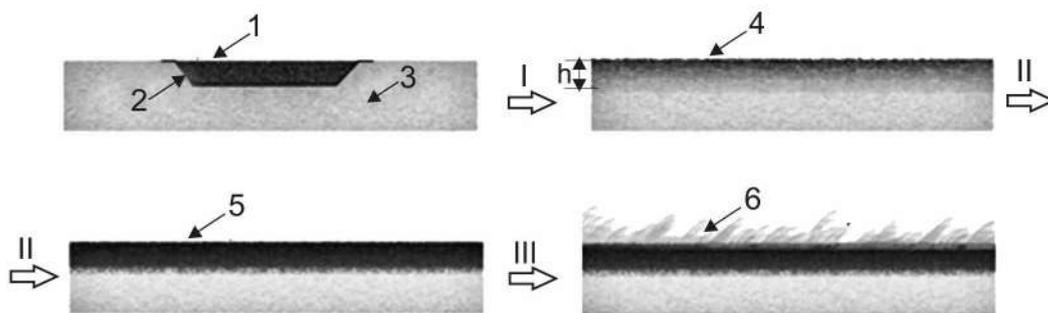


Рис. 3. Схема рекультивации амбара буровых отходов: 1 – буровой шлам; 2 – гидроизоляция; 3 – песчаный грунт; 4 – БШ+10 П; 5 – ГММ+10 П; 6 – зелёные насаждения. Пояснения в тексте
Fig. 3. Scheme of drilling waste pit reclamation: 1 – drilling cuttings; 2 – waterproofing; 3 – sandy soil; 4 – drilling cuttings + sand in a ratio of 1:10; 5 – potentially fertile soil; 6 – green spaces. Explanations in the text

добавление ГП и получение потенциально плодородного грунта – ГММ+10 П. Толщина этого слоя – не менее 20 см для травянистых культур.

Третья операция – внесение семян трав в грунт. В условиях северных регионов России данную операцию рекомендуется производить методом гидропосева согласно нормативным требованиям ПАО «ГАЗПРОМ» (ВРД 39-1.13-058-2002).

Фиторемедиация загрязнённых земель.

Фиторемедиация открывает возможности санации загрязнённых земель с сохранением функции плодородия. Однако данный способ эффективен только при невысокой степени загрязнённости очищаемого грунта – примерно до 10 ПДК поллютанта. Нами предложен способ подготовки высокозагрязнённых тяжёлыми металлами и ПХБ почв к фиторемедиации путём внесения специально подобранных адсорбентов [15].

Для фиторемедиации почв, загрязнённых ПХБ, используют высшие растения – иву и тополь. Для связывания поллютанта предложен адсорбент – биококк, полученный из осадков сточных вод путём пиролиза. В качестве рекультиванта загрязнённых почв можно применять осадки хозяйственно-бытовых сточных вод, которые образуются при сбраживании в метантенках, взятые в равных долях с биококсом (1:1).

Предложенный способ фиторемедиации загрязнённой ПХБ почвы отличается тем, что на первой стадии на загрязнённый земельный участок вносят описанный выше рекультивант с адсорбентом в количестве 0,8–1,6 кг/м², затем производят глубокое рыхление (до 50 см) и дискование почвы с целью активации самоочищающейся способности почвы за счёт насыщения кислородом воздуха и равномерного распределения нового рекультиванта

и адсорбента в почвенном слое. В течение 1–1,5 месяцев почва не подвергается обработке. На второй стадии на очищаемой территории можно высаживать саженцы высших растений – ивы прутовидной (*Salix viminalis*) и тополя чёрного (*Populus nigra*) возрастом 0,5–1 год с плотностью размещения 1–2 дерева на квадратный метр. Далее, не менее трёх месяцев, осуществляется увлажнение загрязнённого земельного участка для поддержания роста высших растений.

Для определения оптимальной дозы внесения рекультиванта исследовалось изменение уровня фитотоксичности почвы с концентрацией стойких органических загрязнителей ПХБ 4527 мг/кг, что превышает установленный уровень ПДК более, чем в 226 тыс. раз. Фитотоксичность почвы оценивали экспресс-методом по степени гибели проростков клевера белого. Результаты изменения фитотоксичности почвы в зависимости от дозы внесения рекультиванта и времени представлены в таблице 6.

Резкое снижение уровня фитотоксичности достигалось при дозе внесения рекультиванта 0,8 кг/м². При дальнейшем увеличении дозы рекультиванта наблюдалось незначительное снижение уровня фитотоксичности.

Результаты фиторемедиации по двум участкам за вегетационный период представлены в таблице 7.

Представленные результаты (табл. 7) позволяют сделать вывод, что адсорбент (биококк) нейтрализует действие стойких органических загрязнителей на высаженные в грунт растения, а рекультивант (осадки хозяйственно-бытовых сточных вод) активируют рост фитомассы с постепенным выведением ПХБ из загрязнённой почвы. Необходимо отметить, что предложенный способ по-

Таблица 6 / Table 6

Фитотоксичность загрязнённой почвы в зависимости от времени и количества внесённого рекультиванта / Phytotoxicity of contaminated soil depending on the time and amount of applied reclamation agent

Время (сутки) Time (day)	Фитотоксичность почвы, выраженная в % от всхожести семян, при разных дозах рекультиванта (кг/м ²) / Soil phytotoxicity, expressed as a percentage of seed germination, at different doses of reclamation agent (kg/m ²)				
	0	0,4	0,8	1,2	1,6
0	80,1±0,5	80,1±0,5	80,1±0,5	80,1±0,5	80,1±0,5
3	80,4±0,9	77,1±0,8	70,7±0,6	69,3±0,2	67,6±0,5
21	79,1±1,2	49,4±0,8	29,4±1,1	25,8±1,2	25,2±0,9
45	80,5±1,1	24,8±2,1	12,2±1,2	10,7±0,8	10,2±0,5

Таблица 7 / Table 7

Результаты фиторемедиации двух почвенных образцов, загрязнённых ПХБ, после выращивания двух типов саженцев в течение 4 месяцев / Results of phytoremediation of two PCB-contaminated soil samples after growing two types of seedlings for 4 months

Образец почвы Soil sample	C _{исх.} , мг/кг C _{initial} , mg/kg	<i>Populus nigra</i>		<i>Salix viminalis</i>	
		C _{ост.} , мг/кг C _{residual} , mg/kg	Степень очистки, % Purification degree, %	C _{ост.} , мг/кг C _{residual} , mg/kg	Степень очистки, % Purification degree, %
1	227±11	4,3±0,8	98,1±0,4	3,78±0,24	98,3±0,1
2	4527±176	1028±165	77,3±3,6	558±75	87,7±1,7

звояет использовать отходы коммунальных предприятий – осадки хозяйственно-бытовых сточных вод для санации земель методом фиторемедиации.

Выщелачивание. Исследованы образцы техногенного грунта с исходным содержанием свинца – 655 мг/кг, цинка – 322 мг/кг, меди – 293 мг/кг. Соединения железа входили в состав исследуемого грунта в количестве более 1% (в пересчёте на оксид железа), что подтверждалось при анализе фоновых проб с незагрязнённых участков.

На рисунке 4 приведены данные по количеству загрязнителей в растворах-выщелачивателях после промывки образцов, содержащих свинец. Данные по концентрации свинца в выщелачивателе, содержащем различное количество азотной кислоты, представлены на рисунке 4а. Содержание свинца в растворе изменяется незначительно (на 5%) при увеличении концентрации азотной кислоты с 1 до 10%. Однако при этом выделение в раствор соединений железа, которые определяют цветность раствора, существенно зависит от концентрации азотной кислоты, как показано на рисунках 4б и 4в. Вероятно, это связано с разрушением структуры глинистых минералов, входящих в состав грунта, и выделением солей железа в раствор.

Статическое выщелачивание приводит к существенному снижению массы образца (от

5 до 15%), как показано на рисунке 5а. Динамическое выщелачивание (выполняется при пропускании 2 л раствора через 200 г образца) позволяет минимизировать падение массы до 1%, но при этом снижается эффективность извлечения загрязнителя (рис. 5б). Однако при увеличении объёма пропускаемого выщелачивателя в 2 раза результаты по извлечению свинца динамическим выщелачиванием становятся сопоставимы с результатами, полученными при статическом режиме экстрагирования (рис. 5в).

Исследования по выщелачиванию цинка и меди из загрязнённого грунта были выполнены по выше описанным методикам. Объём пропущенного через грунт выщелачивателя – 4 литра. Результаты по статическому и динамическому выщелачиванию приведены на рисунке 6. Полученные закономерности по извлечению цинка и меди различными способами аналогичны найденным при выщелачивании свинца (рис. 4 и 5).

Извлечение свинца, меди и цинка методом динамического выщелачивания составило от 80 до 95%, что доказывает перспективность предложенного метода очистки грунта.

Заключение

Предложена концепция реабилитации объектов ОНВОС, в основе которой лежит перевод нарушенных и загрязнённых земель,

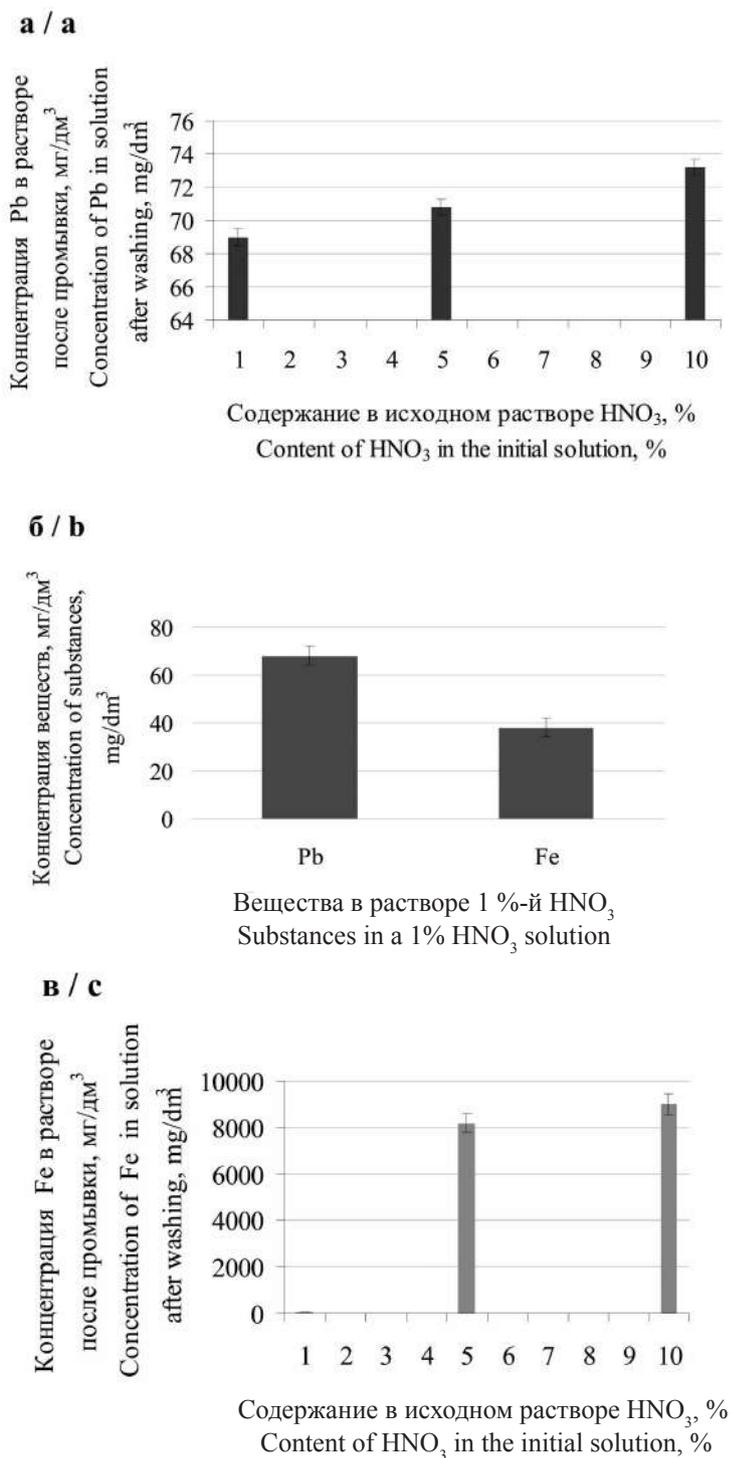


Рис. 4. Содержание свинца (а, б) и железа (б, в) в растворах-выщелачивателях
Fig. 4. Lead (a, b) and iron (b, c) content in leach solutions

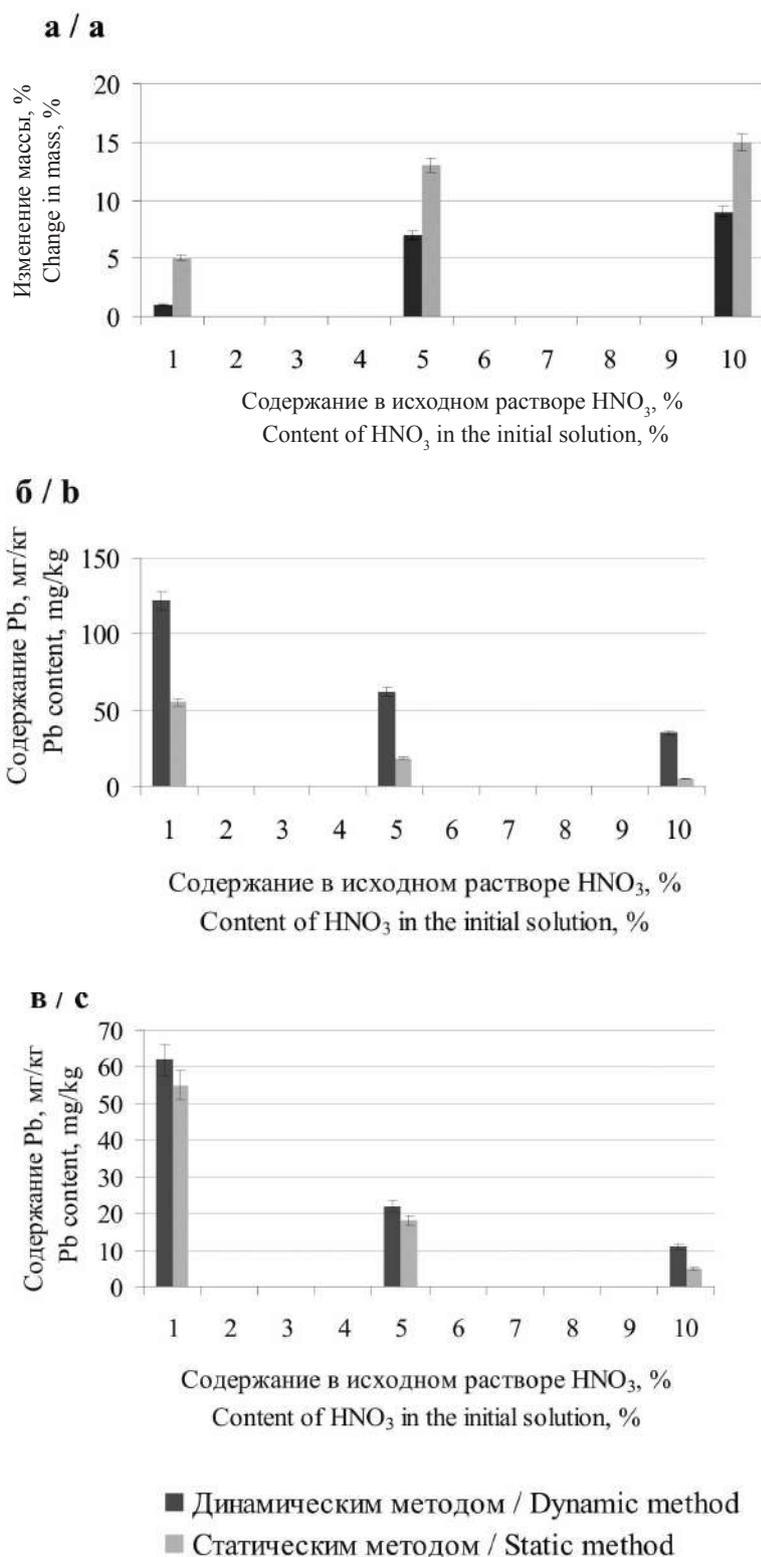


Рис. 5. Изменение массы (а), остаточное содержание свинца (б, в) в образце после выщелачивания динамическим и статическим методами. Объём пропущенного выщелачивателя составляет: б) 2 литра; в) 4 литра
Fig. 5. Change in mass (a), residual lead content (b, c) in the sample after leaching using dynamic and static methods. The volume of the passed leachant is: b) 2 liters; c) 4 liters

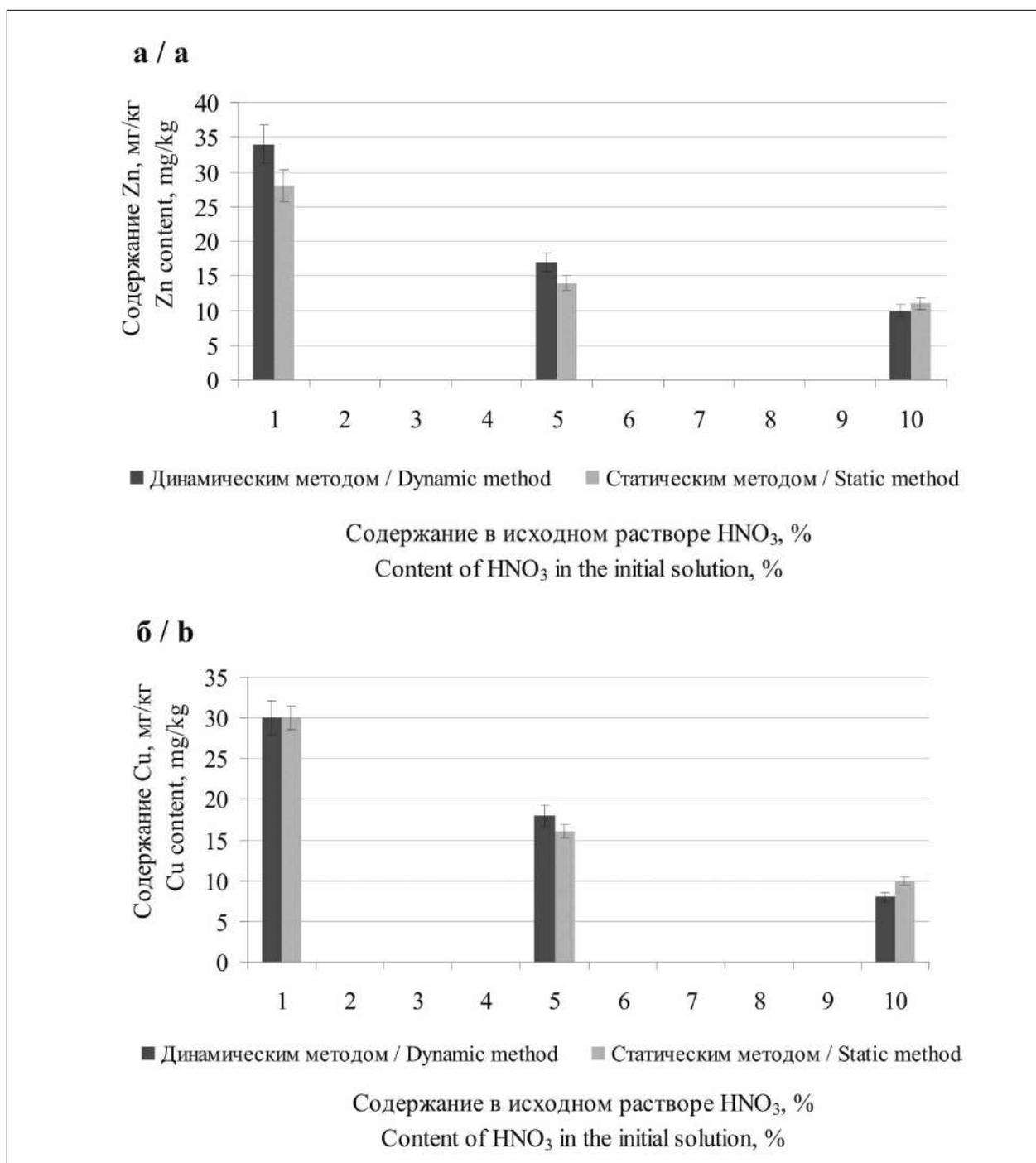


Рис. 6. Остаточное содержание цинка (а) и меди (б) в загрязнённых образцах грунта после выщелачивания динамическим и статическим методами

Fig. 6. Residual content of zinc (a) and copper (b) in contaminated soil samples after leaching by dynamic and static methods

а также отходов в грунт категории «потенциально плодородный» по разработанной инновационной технологии, учитывающей гранулометрический состав, химическое загрязнение, ёмкость катионного обмена, наличие гумуса и безопасность (пятый класс опасности) получаемого субстрата.

Показано, что грунт категории «потенциально плодородный» может быть получен из

инертного (термообезвреженного) грунта с добавлением природных алюмосиликатных адсорбентов (в частности, глауконита и бентонита) и гуминовых препаратов, произведённых из торфа и бурого угля. Буровой шлам, являющийся крупнотоннажным отходом газонефтедобычи, может быть использован как мелиорирующая добавка в сочетании с гуминовым препаратом.

Выполнен комплекс физико-химических исследований по десорбционным процессам в системах грунт-выщелачиватель. Доказано, что динамический способ выщелачивания эффективен при обезвреживании санируемых земель и может быть применён на практике при крупномасштабных загрязнениях земель тяжёлыми металлами.

Термообработка, выщелачивание и фиторемедиация являются основой методологии обезвреживания загрязнённых отходов и земель, а их научно обоснованное применение позволяет эффективно удалять органические и неорганические поллютанты.

References

1. Elimination of accumulated environmental damage. ITS 53-2025. Information and technical reference book on the best available technologies (draft, 2nd edition). Moskva: Ministry of Industry and Trade, 2025. 290 p. (in Russian).
2. Comprehensive environmental audit of the State Unitary Enterprise of the Republic of Karelia "Saksky Chemical Plant". Report. V. 6. Recommendations for bringing the enterprise territory into a safe condition for subsequent use and its involvement in economic circulation. Moskva: OOO NPF Ecocenter MTEA, 2016. 167 p. (in Russian).
3. Danilov A., Smirnov Y., Korelskiy D. Effective methods for reclamation of area sources of dust emission // *Journal of Ecological Engineering*. 2017. V. 18. No. 5. P. 1–7. doi: 10.12911/22998993/74947
4. Golovkov V.F., Koshelev A.V., Afanasyev V.V., Eleev Yu.A. Study of the method of thermal neutralization of soil and building structures contaminated with chlorine-containing compounds and heavy metals // *XXI century: results of the past and problems of the present plus*. 2019. V. 8. No. 01 (45). P. 182–185 (in Russian).
5. Tikhomirova E.I., Alekshashin A.V., Koshelev A.V., Atamanova O.V. Development of technological solutions and methods for obtaining humic-mineral compositions for the tasks of recultivation of oil-contaminated areas // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 4. P. 203–209 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-203-209
6. DeJong J.T., Mortensen B.M., Martinez B.C., Nelson D.C. Bio-mediated soil improvement // *Ecological Engineering*. 2010. V. 36. P. 197–210. doi: 10.1016/j.ecoleng.2008.12.029
7. Bangajavalli S., Selvaraj K. Phytoremediation for sustainable environment in polluted land // *Res. Jr. Agril. Sci.* 2023. V. 14. No. 2. P. 402–407.
8. Odiy B., Ologundudu F.A., Adegbite T. Phytoremediation potential of *Amaranthus hybridus* L. (Caryophyllales: Amaranthaceae) on soil amended with brewery effluent // *Braz. J. Biol. Sci.* 2019. V. 6. No. 13. P. 401–411. doi: 10.21472/bjbs.061308
9. Dan W., Xiaoxue Z., Xuegang L., Yunlai T. Phytoextraction ability of *Amaranthus mangostanus* L. from contaminated soils with Cs or Sr // *J. Bioremed. Biodeg.* 2015. V. 6. No. 2. Article No. 277. doi: 10.4172/2155-6199.1000277
10. Cocârță D.M., Dinu R.N., Dumitrescu C., Reșetar-Deac A.M., Tanasiev V. Risk-based approach for thermal treatment of soils contaminated with heavy metals // *E3S Web of Conferences*. 2013. V. 1. Article No. 01005. doi: 10.1051/e3sconf/20130101005
11. Gebrewold F. Advances in inorganic ion exchangers and their applications. A review article // *Chemistry and Materials Research*. 2017. V. 9. No. 3. P. 1–5.
12. Koshelev A.V., Tikhomirova E.I., Atamanova O.V. Effect of bentonite modification with glycerol on adsorbent structure and physicochemical characteristics // *Russ. J. Phys. Chem. B*. 2019. V. 13. P. 1051–1056. doi: 10.1134/S199079311906006X
13. Allagoa M. Managing drill cuttings waste in our age // *Perspectives and Insights on Soil Contamination and Effective Remediation Techniques* / Ed. K.R. Hakeem. 2024. V. 13. 144 p. doi: 10.5772/intechopen.1006868
14. Gaurina-Međimurec N., Pašić B., Mijić P., Medved I. Deep underground injection of waste from drilling activities – an overview // *Minerals*. 2020. V. 10. Article No. 303. doi: 10.3390/min10040303
15. Troyanovskaya E.S., Tikhomirova E.I., Koshelev A.V., Zamatyryna V.A. Method of adsorption preparation of soil for its purification from heavy metals by phytoremediation // Patent RU 2692554. Application: 2017145729, 25.12.2017. Date of publication: 25.06.2019. Bull. 18 (in Russian).