

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ОТХОДОВ

RECYCLING OF MAN-MADE MINERAL FORMATIONS AND WASTE

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 622.17: 621.796.31/.34

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-1-25-41



РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ХВОСТОХРАНИЛИЩА

Ляшенко В.И.¹, Воробьев А.Е.², Хоменко О.Е.³, Дудар Т.В.⁴

¹Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии, Желтые Воды, Украина

²Атырауский университет нефти и газа, Атырау, Республика Казахстан

³Национальный технический университет «Днепровская политехника», Днепр, Украина

⁴Национальный авиационный университет, Киев, Украина

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Приведены основные результаты исследований, проведенных с целью снижения воздействия на окружающую среду в зоне влияния хвостохранилища путем развития технологий и технических средств при складировании отходов добычи и переработки рудного сырья в виде твердеющих масс. Цель исследования. Анализ и оценка технологий и технических средств для складирования отходов обогащения руд у поверхности хвостохранилища с добавкой отвердителя. Это обеспечит экологическую безопасность окружающей и гидрогеологической среды от загрязнений тяжелыми металлами и защиту населения, проживающего в зоне влияния поверхностного хвостохранилища. Используемые методы. Анализ работ в области складирования отходов гидрометаллургического завода, экологического и гидрогеологического мониторингов, опытно-промышленные и лабораторные экспериментальные исследования, математическое и физическое моделирование, а также теоретический анализ и обобщение результатов исследований по стандартным и новым методикам. Новизна. Предложена новая последовательность заполнения ячейки шламом не по всей ее площади, а наклонными слоями в направлении от одного борта ячейки к другому, обеспечивается стекание излишней воды по наклонным слоям смеси к сливному отверстию и слив (отвод) воды из ячейки через сливные отверстия без применения специальных стационарных или плавучих водозaborных механизмов. Описана новая технология и технические средства для складирования отходов обогащения руд и конструкция чаши для вновь строящегося хвостохранилища. Результаты. Показано, что при заполнении связанными хвостами всей существующей площади зеркала хвостохранилища на высоту ~10 м продолжительность складирования составит более 50 лет. Рекомендовано сооружение водопроницаемого химически активного барьера, перекрывающего продукты выветривания кристаллических пород докембра, в зоне которых идет значительная часть потока подземных вод. Практическая значимость. Существующий мониторинг гидрогеологической среды позволяет контролировать влияние поверхностных хвостохранилищ на водную среду региона. Это обеспечит экологическую безопасность окружающей и гидрогеологической среды от загрязнений тяжелыми металлами и защиту населения, проживающего в зоне влияния поверхностного хвостохранилища при гидропромышленном обогащении руд, добытой на месторождениях Российской Федерации, Республики Казахстан, Украины и других развитых горнодобывающих стран мира.

Ключевые слова: хвосты переработки, обогащение, горная технология, хвостохранилища, отверждение, экология, гидрогеология, безопасность, эффективность.

Благодарность. В организации создания, совершенствования и внедрения научных разработок принимали участие и оказывали содействие специалисты Кошик Ю.И., Масляков Г.А., Тархин Ю.Н., Худошина Н.А., Даудов С.В., Ермолин Г.А., Лозинская А.А. и др.

© Ляшенко В.И., Воробьев А.Е., Хоменко О.Е., Дудар Т.В., 2022

Для цитирования

Развитие технологий и технических средств для снижения воздействия на окружающую среду в зоне влияния хвостохранилища / Ляшенко В.И., Воробьев А.Е., Хоменко О.Е., Дудар Т.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №1. С. 25–41. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-25-41>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES AND TECHNICAL FACILITIES TO REDUCE THE ENVIRONMENTAL IMPACT IN THE AREA OF INFLUENCE OF THE TAILINGS DAM

Lyashenko V.I.¹, Vorobiev A.E.², Khomenko O.E.³, Dudar T.V.⁴

¹Ukrainian Research and Design Institute for Industrial Technology, Zhovti Vody, Ukraine

²Atyrau University of Oil and Gas, Atyrau, Kazakhstan

³National Technical University Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

⁴National Aviation University, Kyiv, Ukraine

Abstract. Problem Statement (Relevance). The paper presents main results of studies carried out to reduce the impact on the environment in the area of influence of the tailings dam by developing technologies and technical facilities for the storage of mining wastes and processing of ore raw materials in the form of solidifying masses. **The purpose of the study.** Is to analyze and evaluate technologies and technical facilities for storing ore dressing wastes near surface tailings dam with an added hardener. This will ensure ecological safety of environment and hydrogeological environment from pollution by heavy metals and protect the population living in the area affected by the surface tailings dam. **Methods Applied.** Analysis of studies in the field of waste storage of a hydrometallurgical plant, environmental and hydrogeological monitoring, pilot industrial and laboratory experimental studies, mathematical and physical modeling, as well as a theoretical analysis and generalization of research results using standard and new methods. **Novelty.** The paper proposes a new sequence of filling the cell with sludge not over its entire area, but with inclined layers in the direction from one side of the cell to the other one; excess water flows down the inclined layers of the mixture to the drain hole and the drain (drainage) of water from the cell through the drain holes is provided without the use of special stationary or floating water intake mechanisms. The paper describes a new technology and technical facilities for storing ore dressing wastes and a basin design for a newly constructed tailings dam. **Results.** It is shown that when the entire existing area of the tailings dam is filled with bounded tails to a height of ~ 10 m, the duration of storage will be over 50 years. It is recommended to build a water-permeable chemically active barrier overlapping the weathering products of crystalline rocks of the Precambrian, in whose zone there is a significant part of the flow of groundwater. **Practical Relevance.** The existing monitoring of hydrogeological environment makes it possible to control the influence of surface tailings dams on water environment of the region. This will ensure ecological safety of environment and hydrogeological environment from pollution by heavy metals and protect the population living in the area affected by the surface tailings dam during the hydro-industrial beneficiation of ores mined at the deposits of the Russian Federation, the Republic of Kazakhstan, Ukraine and other developed mining countries of the world.

Keywords: processing tailings, beneficiation, mining technology, tailings dam, solidification, ecology, hydrogeology, safety, efficiency.

Acknowledgement. Specialists Koshik Yu.I., Maslyakov G.A., Tarkhin Yu.N., Khudoshina N.A., Davydov S.V., Er-molin G.A., Lozinskaya A.A. and others took part and assisted in organizing the creation, improvement and implementation of scientific development.

For citation

Lyashenko V.I., Vorobiev A.E., Khomenko O.E., Dudar T.V. Development of Technologies and Technical Facilities to Reduce the Environmental Impact in the Area of Influence of the Tailings Dam. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 1, pp. 25–41. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-25-41>

Введение

В отечественной практике обращение с отходами гидрометаллургического завода (далее «хвосты ГМЗ») заключается в их складировании в специально оборудованных местах (хвостохранилищах), размещаемых как на территории рудоперерабатывающего предприятия (в пределах единой промплощадки), так и на уда-

лении от него на самостоятельной (отчужденной) территории. По способу укладки хвостов, действующие нормативные документы [1, 2] допускают три вида хвостохранилищ: намывные; наливные; комбинированные. При намывных хвостохранилищах основная часть ограждающей дамбы намывается из переработанного рудного материала. На наливных – дамба возводится из привозных или инертных местных

материалов, а пульпа заливается в образуемую чашу [3, 4].

Анализ мировой практики существующих тенденций в обращении с отходами переработки радиоактивных руд показывает, что перспективным способом создания хвостохранилищ является комбинированный, при котором отходы переработки укладываются в специально оборудованное естественное углубление с ограждающей дамбой, часть которой сооружается из инертных грунтов, а часть отсыпается из переработанного рудного материала в смеси с вяжущим [5, 6].

Недостатком существующей технологии отработки урановых месторождений является накопление на дневной поверхности в отвалах и хвостохранилищах большого количества отходов ГМЗ и пустой породы, что оказывает отрицательное воздействие на окружающую среду и население, которое вынуждено проживать в зоне влияния урановых объектов, особенно в условиях активного земледелия Кировоградской области. Один из путей снижения техногенной нагрузки в зоне влияния горнодобывающих предприятий – совершенствование технологий складирования хвостов после гидроциклонирования и добавки отвердителя [7, 8]. Поэтому актуальным является разработка технологий и технических средств для складирования отходов переработки рудного сырья в поверхностные хвостохранилища с добавкой отвердителя.

Одним из самых проблемных мест является технология складирования отходов переработки рудного сырья, согласно которой хвосты ГМЗ направляются по пульпопроводу в хвостохранилище в виде пульпы с соотношением по массе «твердое – жидкое»: 1 : 2. Жидкая фаза пульпы после отстаивания и осветления в хвостохранилище возвращается в технологический цикл на ГМЗ. Данная технология складирования имеет ряд недостатков [9, 10]:

– высокие единовременные капитальные затраты на строительство хвостохранилища на полную проектную мощность;

– большая вероятность миграции вредных химических веществ в подземные воды при повреждении защитных экранов основания или бортов хвостохранилища.

Данная работа является продолжением исследований, основные научные и практические результаты которых получены в ходе проведения научно-исследовательской работы «Исследование и разработка технологии и рецептов

твердеющих смесей из хвостов ГМЗ-2 для заполнения карт поверхностных хранилищ. Этап 1.5. Технология и рецепты твердеющих смесей их отходов ГМЗ-2 для заполнения карт поверхностного хранилища (заключительный)» (№ ГР 0108U008936, научный руководитель темы В.И. Ляшенко) и наиболее полно приведены в работах [11–15].

Объект исследования – технологии и технические средства для складирования отходов обогащения руд у поверхностного хвостохранилища с добавкой отвердителя для обеспечения охраны гидрогеологической и окружающей среды (в частности, жилая застройка, подрусловый поток р. Желтая, Украина и др.) [16, 17].

Цель исследования – анализ и оценка технологий и технических средств для складирования отходов обогащения руд у поверхностного хвостохранилища с добавкой отвердителя. Это обеспечит экологическую безопасность окружающей и гидрогеологической среды от загрязнений тяжелыми металлами и защиту населения, проживающего в зоне влияния поверхностного хвостохранилища.

Для реализации цели поставлены следующие задачи:

1. Выполнить технологический аудит технологий и технических средств для складирования отходов обогащения руд у поверхностного хвостохранилища.

2. Дать новую конструкцию чаши хранилища, обеспечивающую экологическую и гидрогеологическую безопасность складирования и хранения хвостов обогащения руд.

3. Предложить новую технологию и технические средства для складирования отходов обогащения руд у поверхностного хвостохранилища с добавкой вяжущего.

4. Показать экономическую эффективность и экологическую безопасность складирования отходов обогащения руд у поверхностного хвостохранилища с добавкой отвердителя.

Методология. Анализ работ в области складирования отходов гидрометаллургического завода, экологического и гидрогеологического мониторингов, опытно-промышленные и лабораторные экспериментальные исследования, математическое и физическое моделирование, а также теоретический анализ и обобщение результатов исследований по стандартным и новым методикам с участием авторов [18, 19].

Обсуждение и оценка полученных результатов

Одним из активных источников загрязнения окружающей среды продуктами обогащения руд являются хвостохранилища. В процессе оборудования хвостохранилищ на их поверхностях образуются обезвоженные участки большой площадью. В летние периоды поверхность нагревается до 60°C и сухой слой достигает толщины 30–50 см. Сухие хвосты представляют собой рыхлый песчаный материал, между частицами которого (кроме незначительных сил поверхностного натяжения, молекулярных, химических связей и силикатизации) нет устойчивых связей, например пыль. При скорости ветра 5 м/с и более поверхность хвостохранилища становится интенсивным источником выделения пыли.

Традиционный способ борьбы с пылью на сухих пляжах хвостохранилищ основан на закреплении пылящих поверхностей путем создания пленок или противовоздушных корок. Увлажнение является наиболее употребляемым способом борьбы с пылью. Увлажнение самого высокого (2500 м) хвостохранилища в мире Мауро на руднике Лос-Пеламбрес в Чили показано на **рис. 1** [20].



Рис. 1. Хвостохранилище Мауро на медно-молибденовом руднике Лос-Пеламбрес в Чили
Fig. 1. The Mauro tailings dam at the Los Pelambres copper-molybdenum mine in Chile

Таблица 1. Прочность закрепления поверхности хвостохранилища
Table 1. Strength of stabilizing the surface of the tailings dam

Технология закрепления массива	Прочность, МПа		
	Минимум	Максимум	Средняя
Глинизация	0,05	2,2	1,1
Цементизация	0,22	6,6	1,7
Силикатизация	0,10	10,0	3,2
Битумизация	0,10	2,0	1,2
Комбинированная с добавкой ПВА	0,10	3,3	1,4
Закрепление травами	Закрепление травами		
Карбонатизация	0,30	1,50	0,80
Химическое закрепление	0,30	0,46	0,67

Влажный пляж не пылит, однако влага иногда испаряется и такой пляж требует дополнительной подачи воды, что очень затратно. Кроме того, рекультивация таких хвостохранилищ будет затруднена из-за низкой прочности их поверхностей. На поверхность хвостохранилищ наносят закрепители. В хвостохранилищах наливного типа легкие фракции (иловая и глинистая) концентрируются в верхнем слое пляжей. В верхнем (10–20 мм) слое находится до 90% частиц этих фракций. Коэффициент фильтрации верхнего слоя составляет в среднем 0,02–0,03 м/сут. Из-за малой фильтрации проникновение закрепляющих растворов вглубь хвостов не происходит и нерастворимая корка не образуется. После высыхания на поверхности закрепителя образуется тонкая пленка, которая легко разрушается и смывается водой. Большая часть закрепляющего раствора уходит по трещинам или собирается в сформированных углублениях. Противовоздушная пленка является плоскостью скольжения с пониженными прочностными характеристиками – угол внутреннего трения и сцепление, что способствует разрушению дамб. Хвосты обогащения с различными наполнителями и добавками подвергаются природному выщелачиванию, продукты которого нарушают экосистемы окружающей среды (**табл. 1**).

Технологии с закреплением хвостов выщелачивания продуктами вторичной минерализации в течение 40 лет использовали при разработке уранового месторождения «Быкогорское» (Северный Кавказ) способом подземного шахтного выщелачивания 3-процентным раствором серной кислоты. В результате кольматационных процессов хвосты выщелачивания приобретали прочность 0,5–1,0 МПа [21, 22]. Авторами систематизированы технологии управления состоянием хвостохранилищ и предложена их классификация (**табл. 2**). Она отличается от ранее известных тем, что в качестве основного критерия принят показатель выноса реагентов в природу.

Таблица 2. Классификация способов управления хвостохранилищами
Table 2. Classification of tailings management methods

Технология обработки хвостов	Вариант	Достиныства	Недостатки
Верхнего слоя	Глинизация	Малые затраты, наличие материалов	Малая прочность
	Цементация	Высокая прочность	Высокие затраты
	Силикатизация	Высокая прочность	Сложность
	Карбонатизация	Простота, надежность, утилизация карбонатов	Сложная расконсервация
	Биозакрепление	Простота и доступность	В комбинации
	Кольматация без извлечения металлов	Простота, надежность, утилизация отходов	Загрязнение металлами и солями
Всего массива	Без извлечения металлов	Простота, надежность, утилизация продуктов электрохимии, экологичность	Не используется возможность утилизации с получением товара
	С извлечением металлов	Простота, окупаемость, экологичность	Нет

Технология пылеподавления. Пылеподавление осуществляется нанесением на пылящую поверхность битумной эмульсии тонким слоем. Расход битумной эмульсии составляет 0,12 кг/м², то есть для защиты требуемых, например, 1 000 000 м² пылящей поверхности дамбы необходимо около 120 т битумной эмульсии в год. Для приготовления 120 т эмульсии необходимо около 60 т битума, 60 т воды и эмульгатор 3,6 т. Приготовление битумной эмульсии выполняется с помощью специального генератора эмульсии. Срок действия защиты от пыления один год. Слой нанесенной эмульсии на намывном пляже не создает противофильтрационного экрана, то есть не уменьшает устойчивость дамбы, не загрязняет фильтрационную воду нефтепродуктами или другими вредными веществами, а значит, экологически безопасен. В результате выполненных работ по пылеподавлению по данным санитарно-эпидемиологической службы содержание пыли в воздухе над и вокруг хвостохранилища ниже предельно допустимых концентраций. Для стационарного применения технологии необходимо следующее оборудование и сооружения: генератор эмульсии; склад битумной эмульсии; оборудование для загрузки и разгрузки эмульсии; автомобиль, трактор или вертолет; навесное оборудование для разбрзгивания эмульсии. Недостатком такой технологии является ее краткий срок действия (один год), а также низкая прочность поверхностного слоя хранилища, что затрудняет процесс рекультивации данного хвостохранилища.

Технология пылеподавления на основе раствора природного бишофита. На сухих пляжах действующих хвостохранилищ ГОКов ОАО

«Арселор Миттал Кривой Рог» и ОАО «СевГОК», Украина, проведены промышленные исследования эффективности предложенной технологии закрепления поверхности хвостов на основе раствора природного бишофита (РПБ). Как показали промышленные исследования эффективности технологии, предложенной для закрепления сухих поверхностей действующих хвостохранилищ в условиях ОАО «СевГОК», Украина, наблюдается уменьшение загрязненности воздуха пылью от 4,6 до 17 раз (табл. 3).

Таблица 3. Результаты закрепления поверхности хвостохранилища ОАО «СевГОК»

Table 3. Results of stabilizing the surface of the tailings dam of OJSC Northern Mining and Processing Plant

Температура воздуха, °C	Относительная влажность воздуха, %	Скорость ветра, м/с	Влажность хвостов		Запыленность воздуха, мг/м ³	
			Обработано РПБ	Контроль	Обработано РПБ	Контроль
-4,8	70	3,0-4,0	5,52	4,61	0,16	2,60
8	84	5,4-6,0	11,30	1,60	1,13	6,00
25	63	4,4-4,8	9,01	1,30	1,00	4,60
26	60	2,5-3,0	8,80	0,15	0,26	4,50
26	60	2,5	6,00	0,15	0,44	4,50

РПБ, в отличие от других средств, может использоваться на протяжении всего года и не нуждается в специальном оборудовании. Раствор на поверхности пляжей наносился гидромониторами, смонтированными на базе автомобилей БелАЗ-7648, которые, двигаясь по дамбам, закрепляли поверхность хвостов. Дальность дей-

ствия струи с учетом направления ветра находилась в пределах 50–120 м, что позволило обработать РПБ всю поверхность карты. Отдельные участки карт (в центре или недостаточно закрепленные) с экспериментальной целью обрабатывали с помощью распылителей, установленных на пожарные рукава.

Высота падения капель РПБ на поверхность карты превышала 1 м, оптимальные затраты прияты в пределах 1,5–2 л/м². Во время исследований на предприятиях было закреплено 9 карт общей площадью свыше 200 га. В ходе экспериментов установлено что использование РПБ с концентрацией (плотностью) не меньше 1250 кг/м³ имеет наиболее продолжительный эффект закрепления (не меньше 70 сут), поэтому при необходимости кратковременного закрепления можно уменьшить затраты за счет использования водного раствора с меньшей плотностью. Для определения оптимальной технологии промышленного использования раствора бишофита в условиях отвального хозяйства ГОКов Кривбасса, Украина, и подбора наиболее рациональных схем нанесения раствора на участок закрепления была проведена серия промышленных исследований. Они показали, что для кратковременного закрепления поверхности хвостохранилищ в сухую погоду можно использовать закрепители на базе ГИПАНа, лигносульфоната, поликариламида.

Технология пылеподавления по складированию отходов гидрометаллургической переработки руд. Так, с начала эксплуатации Желтореченского железорудного (1895 г.) и уранового (1951 г.) месторождений (Украина) образовались:

– 2 карьера – «Габаевский» и «Веселоивановский», 4 хвостохранилища – отработанный карьер бурых железняков (КБЖ), «Разбери» и «Терновская» и воронка обрушения – как следствие подземной разработки железорудного месторождения системами с принудительным обрушением руд и вмещающих пород (ГП «ВостГОК», г. Жёлтые Воды, Украина);

– балка «Щербаковская» (рис. 2) (ГП «ВостГОК», Петровский район, Украина).

По своему химическому составу твердая часть хвостов близка к исходной руде, из которой удалено основное количество урана, вследствие чего

их удельная радиоактивность снижается на 15%. В результате распада некоторых короткоживущих радионуклидов (²³⁰Th, ²²⁶Ra, ²¹⁰Pb, ²¹⁰Po, ⁴⁰K и др.) в хвостах остается до 70% первоначальной активности урановой руды. Характеристики хвостов ГМЗ приведены в табл. 4–6.

Под хвостохранилище для складирование хвостов ГМЗ использован отработанный карьер бурых железняков (КБЖ), состоящий из большой и малой чаши, разделенных перемычкой. Малая чаша хвостохранилища вытянутой формы длиной до 800 м, шириной 100–250 м. Глубина карьера в этой части 12–15 м, дно его врезано в верхненеоген-нижнечетвертичные красно-бурые глины на 2–5 м [23, 24]. Стенки карьера сложены средне-верхнечетвертичными лессовыми суглинками. Большая чаша (основной карьер) почти овальной формы в плане. По длиной оси чаша простирается с севера на юг на 1,2 км, а по короткой оси – с запада на восток на 300–500 м.

В карте №3 остался водоем (прудок-отстойник) с абсолютной отметкой водного зеркала 148,25 м, служащий для аварийного сброса хвостов ГМЗ. Общий объем хвостов, накопленных в хвостохранилище с начала его эксплуатации, составляет около 12,4 млн м³. Плотность хвостов в среднем составляет 1,73 т/м³, плотность в сухом состоянии 1,46 т/м³, плотность частиц – 2,67 т/м³. По гранулометрическому составу хвосты представлены песками мелкими, реже пылеватыми, местами супесями.



Рис. 2. Общий вид хвостохранилища в балке «Щербаковская» по складированию отходов гидрометаллургической переработки руд

Fig. 2. General view of the tailings dam in the Shcherbakovskaya ravine for storing waste from hydrometallurgical ore processing

Таблица 4. Химический состав хвостов ГМЗ

Table 4. Chemical composition of tailings of the leach plant

Компонент	U	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	ZrO ₂	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	H ₂ O
Содержание	0,01	61,16	17,08	1,25	2,16	0,095	0,4	0,04	0,20	3,64	1,12	0,42	9,28	0,04	0,16

Таблица 5. Физические характеристики хвостов ГМЗ
Table 5. Physical characteristics of tailings of the leach plant

Наименование показателей	Величина
Плотность хвостовой пульпы, г/см ³	-1,2
Плотность твердого в пульпе, г/см ³	-2,46–2,9
Плотность скелета, т/м ³	1,56
Влажность, %	26–30
Грансостав, %:	
+ 0,15 мм	4,0–8,0
- 0,15–0,074	22–30
- 0,074–0,043	34–44
- 0,043–0,005	30–40
- 0,005	2,1

Таблица 6. Содержание радионуклидов в хвостах ГМЗ
Table 6. Content of radionuclides in tailings
of the leach plant

Наименование показателя	Содержание	
	Твердая фаза, Бк/дм ³ твердая фаза, Бк/кг	Жидкая фаза, Бк/дм ³
Ra-226	454–12789	1,2–3,7
Th-230	2197–9768	0,09–0,38
Pb-210	8639–13634	0,05–0,24
Po-210	7955–11936	0,04–0,22
U-238	2516	0,02–0,10
Суммарная альфа-активность	1100–27800	–

Глубина карьера в этой части около 60–65 м, размеры днища составляли 600–150 м. Дно карьера врезано в докембрийские кристаллические породы. Борта карьера сложены (снизу вверх) полтавскими песками мощностью до 30 м, сарматскими песками и глинами песчаными мощностью до 15 м, глинами верхненеоген-нижнечетвертичными мощностью до 15 м и средне-верхнечетвертичными лессовыми суглинками мощностью до 10 м. Хвостохранилище начали эксплуатировать с 1964 г. К 1982 г. произошло заполнение карьера отвальной пульпой ГМЗ, уровень воды достиг отметки 145,13 м, с этого времени оно используется как резервное.

Общая площадь хвостохранилища, включая дамбы, составляет 55 га. Территория хвостохранилища была разделена дамбами на шесть карт. В 1982–83 гг. были выполнены первые рекультивационные работы на площадке карты №5 (южная часть малой чаши). Затем территория карт №1, 4, 6 была покрыта слоем суглинка средней мощностью 0,5 м. В 1995–96 гг. выполнен первый этап рекультивации. В настоящее

время вся территория хвостохранилища покрыта рекультивационным слоем мощностью от 0,4 до 5,6 м (рис. 3).



Рис. 3. Горнотехническая рекультивация хвостохранилища в карьере бурых железняков

Fig. 3. Mining reclamation of the tailings dam in a brown iron ore quarry

Хвостохранилище расположено в 1,5 км к югу от г. Желтые Воды, Украина, в балке «Щербаковская» («Щ»), являющейся правым притоком реки Желтая. Абсолютные отметки поверхности земли изменяются от 142 м на водоразделе до 95 м в днище балки. Балка «Щ» является составной частью овражно-балочной сети реки Желтой и состоит из двух ответвлений – северного и западного. Ближайшими к хвостохранилищу водотоками являются реки Желтая и Зеленая, протекающие с севера на юг соответственно в 1,0–1,5 км восточнее и в 6,5–7,5 км западнее хвостохранилища [25, 26].

Хвостохранилище «Щ» является гидroteхническим сооружением I класса и относится к экологически опасным объектам. Санитарно-защитная зона хвостохранилища – 1000 м. Используется как накопитель промышленных отходов гидрометаллургического завода (ГМЗ) с 1959 г. Оно наливное, балочно-равнинного типа, то есть ёмкостью для наполнения или чашей служит естественное понижение в рельефе. В настоящее время хвостохранилище состоит из двух секций (старая и новая).

Старое хвостохранилище сооружено путем перекрытия северного ответвления балки плотиной (в настоящее время разделительная дамба) и эксплуатировалось с 1959 по 1979 гг. Имеет длину 1,8 км, ширину 0,9 км, площадь 98,4 га, полезный объем около $5,4 \cdot 10^6$ м³. В верховье балки старое хвостохранилище ограждено отсечной дамбой с абсолютной отметкой гребня 138,4 м. Разделительная дамба имеет протяженность около 1,5 км, ширину по гребню 3–4 м. Абсолютные отметки гребня изменяются в пределах 138,0–140,8 м. Площадь водной поверхности

сти на этот период равна 836 тыс. м², объем воды в пруде 2935 тыс. м³, средняя глубина пруда 3,51 м. В настоящее время используется как резервное.

Новое хвостохранилище имеет площадь 151,8 га. Проектный объем – 25,84·10⁶ м³. Ограждающее сооружение состоит из основной плотины, разделительной дамбы и ограждающих дамб и выполнено из уплотненных лессовых суглинков. Основная плотина ограждает новое хвостохранилище с востока. Общая протяженность плотины с бортами составляет 1,8 км. Профиль плотины одно-, двух- и трехъярусный; абсолютные отметки гребня изменяются от 138,0 до 139,1 м. Высота изменяется от 7,0 до 44,0 м в тальвеге балки.

Ограждающая дамба ограничивает новое хвостохранилище с юга и запада. Южный участок ограждающей дамбы имеет протяженность 1,5 км. Профиль одноярусный, абсолютные отметки гребня изменяются от 137,9 до 137,4 м. Высота дамбы варьирует в пределах 10,3–14,5 м. Западный участок ограждающей дамбы имеет протяженность 1,9 км; профиль одноярусный с изменяющейся высотой от 1,2 до 14,3 м.

В новом хвостохранилище имеется прудотстойник с абсолютной отметкой водной поверхности на июль 2006 г. 135,68 м и площадью водного зеркала 624 тыс. м². Объем воды в пруде составляет 1544 тыс. м³, средняя глубина пруда 2,47 м. Новое хвостохранилище эксплуатируется с 1979 г. по настоящее время. Заскладированные отходы находятся под слоем воды. В процессе заполнения хвостохранилища изменились гидродинамические и гидрохимические условия в районе, прилегающем к хвостохранилищу.

Технологии и технические средства для складирования отходов гидрометаллургической переработки руд с добавкой отвердителя. Для минимизации отрицательных влияний на окружающую среду во время строительства хвостохранилища, эксплуатации и хранения отходов предполагается:

- расположение хранилища в естественном понижении местности (балке), что с санитарно-экологической точки зрения является более благоприятным и обеспечивает наименьшую длину искусственных ограждающих дамб;

- строительство ограждающих дамб из естественных материалов – уплотненного суглинка;

- изоляция днища и внутренних откосов хранилища противофильтрационным экраном, который включает слой уплотненного суглинка и

полиэтиленовую пленку высокой плотности (геомембранны фирмы Engineering Dobersek GmbH, Германия типа НБРЕ G/G (для дна) и HDPE T/G (для откосов 1,0/2,5). Экран надежно защищает геологическую и гидрогеологическую среды от химического и радиоактивного загрязнения;

- хранение отходов гидрометаллургической переработки уранового сырья в иммобилизованном (связанном) состоянии, которое снижает вероятность миграции вредных химических веществ и естественных радионуклидов в окружающую среду;

- устройство водоотводных канав по периметру хранилища, которые исключают поступление дождевых вод в чащу хранилища с близлежащей территории;

- устройство санитарно-защитной зоны хранилища размером 1000 м, ее озеленение;

- поэтапное складирование отходов и рекультивация заскладированного участка;

- складирование и хранение плодородного слоя грунта и суглинка, который вынимается во время инженерной подготовки территории для дальнейшего использования их в строительстве и рекультивации заскладированного массива отходов;

- использование вентиляционного и очистного оборудования, орошение разрабатываемых грунтов с целью обеспечения соответствия загрязнения атмосферного воздуха санитарно-гигиеническим требованиям;

- своевременные сбор, хранение и утилизация образующихся промышленных отходов в соответствии с разработанными и согласованными лимитами предприятия в целом;

- рекультивация территории хранилища и близлежащей к нему территории после окончания эксплуатации;

- озеленение рекультивированной территории травяной и кустарниковой растительностью;

- постоянный мониторинг компонентов окружающей среды в зоне влияния хранилища.

Для создания монолитного массива иммобилизованных отходов планируется вести укладку смеси из обезвоженных хвостов и вяжущего «блоками». Для формирования «блока» на предварительно подготовленном основании хранилища отходов создается прямоугольное ограждение – «карта» из отходов горного производства (хвосты обогащения и пустая порода). Размеры «карты» создаются из условия укладки тридцатидневного объема подготовленных к иммобилизации

хвостов ≈ 138 тыс. м³, что при высоте 5 м составят 150×190 м. Ширина верхней поверхности сторон «карты» принималась 6 м из условий проектирования на ней бетонопровода и проезда техники, а ширина основания – 21 м (рис. 4).

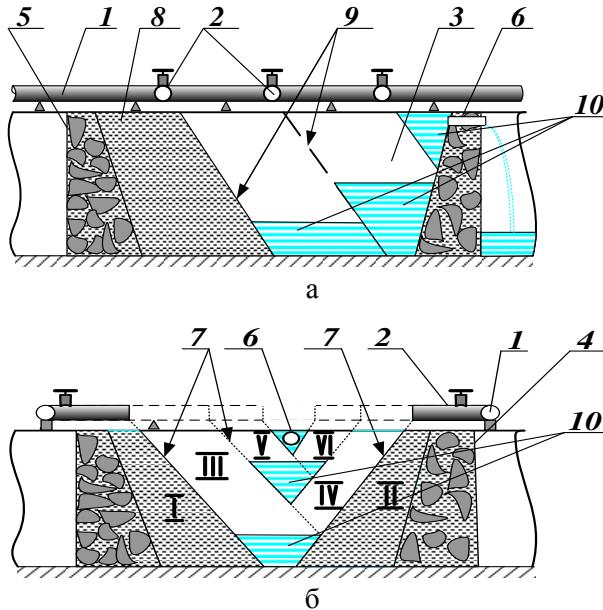


Рис. 4. Технологическая схема укладки отходов гидрометаллургического производства в поверхностные хвостохранилища:
а, б – соответственно схемы укладки хвостов в продольном и поперечном направлениях ячейки шламохранилища: 1 – трубопровод; 2 – выпуски; 3 – ячейки хвостохранилища; 4, 5 – соответственно борта продольные и поперечные хвостохранилища; 6 – отверстия сливные; 7 – поверхность наклонная; 8, 9 – слои наклонные; 10 – жидкость пульпы; I–VI – номера участков

Fig. 4. Process flow diagram of laying waste from hydrometallurgical production in surface tailings dams: a, b are layouts of tailings in the longitudinal and transverse directions of the sludge storage cell, respectively: 1 is a pipeline; 2 is outlets; 3 are tailings dam cells; 4, 5 are longitudinal and transverse sides of the tailings dam, respectively; 6 are drain holes; 7 is an inclined surface; 8, 9 are inclined layers; 10 is pulp liquid; I–VI are section numbers

Для снижения трудоемкости отвода лишней воды из ячеек нового хвостохранилища и сокращения сроков их рекультивации, шламы по трубам подают в ячейки с бортов хранилища поочередно (см. рис. 4). После отвердения порции смеси в хранилище образуют наклонные слои, направленные навстречу друг другу и в сторону поперечно расположенного борта. По наклонным слоям вода стекает вниз ячейки, а каждый

последующий слой смеси вытесняет эту воду к поперечно расположенному борту. В дамбе поперечного борта выполнены сливные отверстия, через которые осуществляется слив лишней воды в последующую ячейку. После слива воды из ячейки отверстия закупоривают и с противоположного поперечно расположенного борта начинают рекультивацию ячейки хвостохранилища.

Для транспортирования и укладки смеси предусмотрены бетононасосы BSA1400HP-D производительностью 10^2 м³/ч и максимальной дальностью подачи 1300 м. С целью предотвращения схватывания готовой смеси в оборудовании и трубопроводах при неизбежных остановках необходимо использовать добавки, регулирующие процесс гидратации вяжущего.

По рекомендации фирмы Engineering Dobersek GmbH (Германия) при подготовке хвостов к отверждению их обезвоживают до получения пульпы с содержанием до 80% твердого компонента и направляют на смешение с цементом (вязущим) в смеситель.

Для равномерного заполнения «блока» на обеих сторонах «карты» укладываются бетонопровод с необходимым количеством выпусков. Заполнение «блока» ведется из каждого бетонопровода. После заполнения «карты» производят укладку смеси в последующую, предварительно подготовленную «карту», а предыдущую после набора необходимой прочности рекультивируют. Создание «карты» для укладки смеси обезвоженных хвостов с вяжущим обусловлено несколькими факторами. Согласно практике укладки бетона, количество воды в 1 м³ смеси не должно составлять более 160–180 л, а в 1 м³ обезвоженных хвостов оно составляет 270–350 л. Излишки воды способствуют расслаиванию смеси при укладке и вымыванию из нее мелкой фракции, в том числе и большого количества вяжущего, что, в свою очередь, снижает прочность иммобилизованных хвостов.

Создание противофильтрационной дамбы в виде «карты» будет предотвращать бесконтрольное растекание шламовой части смеси и, в конечном итоге, способствовать созданию монолитного «блока». Формирование «блока» будет проводиться непрерывно в любое время года, и при обильных осадках вымывание вяжущего будет проходить интенсивней, а избыток воды может просачиваться через дамбу. Для сбора дождевых стоков, промывных вод из бетонопроводов, испарения избытка оборотных вод со стабилизаторов вниз по рельефу предусматривается прудок-испаритель. При укладке «блоков» в пе-

риод сильных морозов необходимо использовать добавки, повышающие морозостойкость смеси, а также уменьшать размеры «карт» с целью сохранения положительной температуры в «блоке», необходимой для набора прочности. Для улучшения прочностных характеристик иммобилизованных хвостов в состав смеси необходимо добавлять мелкую фракцию – 15 мм (отсев отходов горного производства).

Установка по получению отсева монтируется на борту хранилища. Для создания прочного массива и предотвращения разрушения верхнего слоя застывшего (затвердевшего) «блока» при укладке на него последующих слоев с применением техники расход вяжущего для иммобилизации хвостов принят как для приготовления бетона высоких марок.

Таким образом, установлена возможность использования твердеющих смесей с применением в качестве вяжущего цемента, доменного гранулированного шлака и золы, а в качестве наполнителя – хвостов ГМЗ для их иммобилизации при заполнении карт поверхностных хвостохранилищ, определена прочность, рецептура и последовательность укладки полученной твердеющей смеси в хранилище [27, 28].

Складирование отходов горно-металлургического производства в балке. Оно заключается в организации хранилища отверженных отходов (рис. 5). С этой целью предусматривается разделение хвостовой пульпы на твердую и жидкую фазы. Жидкая фаза возвращается на ГМЗ в оборотный цикл, а твердая после обезвоживания на фильтрах смешивается с цементом и в виде цементного раствора укладывается на предварительно подготовленную поверхность хвостохранилища высотой до 10 м. После достижения необходимой прочности массив рекультивируется. Для предлагаемого складирования на территории хвостохранилища потребуется создание комплекса подготовки хвостов, состоящего из корпуса обезвоживания, склада обезвоженных хвостов, склада цемента, узла приготовления раствора, сгустителей, конвейерных галерей и вспомогательных сооружений. При заполнении связанными хвостами всей существующей площади зеркала хвостохранилища на высоту ~10 м продолжительность складирования составит более 50 лет. Существующий мониторинг позволяет контролировать влияние ГМЗ, хвостохранилищ «КБЖ» и «Щ» на водную среду региона [29, 30].

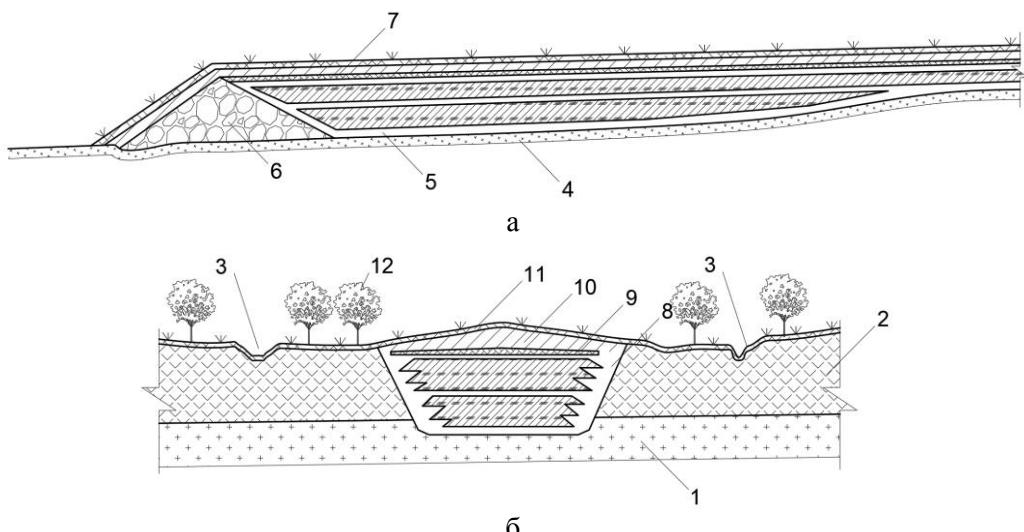


Рис. 5. Схема утилизации твердых отходов горно-металлургического производства в балке (полиэтиленовая мембрана на схеме не показана): а, б – продольное и поперечное сечения: 1 – супесь; 2 – суглинок; 3 – дренажная канава; 4 – основание балки; 5 – антифильтрационный слой из глины; 6 – отвал пустой породы; 7 – сорбционный слой из суглинка мощностью 0,5 м; 8 – гидроизоляция из глины; 9 – биопроникающий дренажный слой щебня; 10 – гидроизоляционный слой суглинка мощностью 1,5 м; 11 – плодородная почва мощностью 0,3 м; 12 – деревья (должна быть вся территория покрыта лесом после нанесения плодородной почвы)

Fig. 5. Diagram of disposal of solid waste from mining and metallurgical production in a ravine (a polyethylene membrane is not shown in the diagram): а, б are longitudinal and cross sections: 1 is sandy loam; 2 is loam; 3 is a drainage ditch; 4 is a ravine base; 5 is an anti-filtration clay layer; 6 is waste rock dump; 7 is a 0.5 m thick loam sorption layer; 8 is clay waterproofing; 9 is a bio-penetrating crushed stone drainage layer; 10 is a waterproofing layer of loam with a thickness of 1.5 m; 11 is fertile soil 0.3 m thick; 12 are trees (the entire area should be covered with forest after the application of fertile soil)

Вместе с тем предлагается расширить сеть мониторинга: создать 4 наблюдательных поста (по 2) на реках Желтая и Зеленая в пределах зон наблюдения; восстановить наблюдательные скважины на территории ГМЗ, восстановить и пробурить дополнительные скважины для уточнения площади загрязнения подземных вод и распространения водоносных горизонтов. Для оценки эффективности водопроницаемого химически активного барьера, перекрывающего продукты выветривания кристаллических пород до кембрия, в зоне которых идет значительная часть потока подземных вод, его протяженность должна составлять не менее 100 м, минимальная глубина 6,0 м.

При этом следует иметь в виду, что гипсометрия кровли кристаллических пород, до которой предполагается произвести устройство ВХАБ, может значительно изменяться, поэтому до начала строительных работ с целью уточнения реальных объемов и эффективности перекрытия водоносного горизонта необходимо произвести бурение 11-ти разведочных скважин по линии расположения ВХАБ через каждые 10 м. Глубина скважин составит в среднем 10 м. Общий объем бурения 110 м [31, 32].

Для контроля эффективности работы ВХАБ необходимо соорудить наблюдательную сеть скважин, контролирующую входные и выходные потоки подземных вод, состоящую из трех профилей. Каждый профиль должен состоять из четырех скважин. Общий объем бурения составит 120 м. Для решения экологических задач при хранении хвостов переработки урановых руд авторы считают целесообразным сооружение по технологии «стена в грунте» полуактивных водопроницаемых химически активных барьеров (ВХАБ) и биологических технологий. Это обеспечивает снижение степени загрязненности металлами грунтовых и поверхностных вод, почв и отложений [33, 34].

Сегодня для удаления урана используются различные материалы, такие как активированный уголь, синтетические смолы, цеолиты, материалы биологического происхождения и др. Синтетические сорбционные материалы имеют высокую эффективность удаления неорганических токсикантов, однако их недостатком является высокая стоимость и многоэтапный синтез. Использование глин в качестве сорбентов перспективное, учитывая различные возможности модификации их поверхности для создания функциональных материалов с новыми улуч-

шенными свойствами. Обработка поверхности глинистых минералов оксидами и гидроксидами железа повышает их адсорбционную способность по отношению к неорганическим токсикантам. При этом полученные сорбенты имеют как анионообменные, так и катионообменные свойства. Поэтому разработка композитов на основе природных глинистых минералов

путем их модифицирования соединениями железа для эффективного извлечения соединений урана и других неорганических токсикантов с загрязненных минерализованных вод является своевременной и актуальной задачей. Для чего авторы рекомендуют исследовать [35, 36]:

- геологическую, гидрологическую, экологическую и социально-демографическую характеристики промышленных площадок, прилегающих к горнодобывающему региону;

- выполнить анализ пространственных и временных характеристик распределений металлов в окружающей среде, пустых породах, хвостах, почвах, грунтовых и поверхностных водах;

- дать оценку рисков для окружающей среды и здоровья людей, подверженных воздействию загрязненных почв, грунтовых и поверхностных вод, а также оценку нейротоксического риска, связанного с марганцем, свинцом и кадмием;

- определить наиболее подходящие площадки в регионе для возможного применения ВХАБ с использованием неорганических наполнителей и бактериальных биореакторов на основе сульфатредуцирующих бактерий при удалении металлов из загрязненных грунтовых вод.

Синтез и исследование методов модификации слоистых силикатов с целью создания на их основе сорбционных материалов широкого назначения в зоне миграции тяжелых металлов и радионуклидов из водных растворов адсорбентами на основе глинистых минералов, размещенных в ВХАБ, рассмотрены в [37, 38].

Результаты внедрения. Предложенная в статье технология и технические средства складирования хвостов при заполнении карт поверхностных хвостохранилищ с добавкой вяжущего использована ГП «УкрНИПИИ-промтехнологии», Украина, в технико-экономическом обосновании строительства предприятия на базе рудных месторождений ГП «Восточный горно-обогатительный комбинат», Украина. Показано, что при подземной добыче руды около 50–55% хвостов обогащения используют для закладки техногенных пустот, а остальную часть, соединенную с вяжу-

щим материалом, складируют в поверхностные хранилища [39, 40].

Перспективные направления исследований.

Результаты химического опробования подземных вод из режимных скважин являлись предметом детального изучения в процессе полевой экспедиции, выполненной ГП «УрНИПИпромтехнологии», Украина, с участием представителей агентства США по защите окружающей среды и специалистов национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского». ВХАБ рекомендуется установить в водоносном горизонте кристаллических пород докембрия и продуктов их выветривания на участке, где другие водоносные горизонты, распространенные в этом районе, выклиниваются, а разгрузка подземных вод при этом происходит в водоносный горизонт современных аллювиальных отложений и в реку Желтая, в связи с чем этот участок является наиболее оптимальным для проведения эксперимента [33].

Заключение

На основании результатов исследований, полученных с целью анализа и оценки технологий и технических средств для складирования отходов обогащения руд у поверхностного хвостохранилища с добавкой отвердителя для обеспечения охраны гидрогеологической и окружающей среды, а также населения, проживающего в зоне влияния горных объектов, сделаны следующие выводы:

1. Данная конструкция чаши хранилища, обеспечивающая экологическую и гидрогеологическую безопасность хранения хвостов, которая содержит:

- уплотненный суглинок мощностью 0,5 м, плотностью 1,6 г/см³, с коэффициентом фильтрации 0,1–0,2 м/сут;
- геомембранные типов HDPE G/G (для дна) и HDPE T/G (для откосов 1,0/2,5);
- защитный слой песка мощностью 0,10 м и нагорные канавы на весь период заполнения хранилища.

2. Установлена возможность использования твердеющих смесей с применением в качестве связующего отходов смежного производства и предложен оптимальный состав их ингредиентов на 1 м³ смеси: хвосты ГМЗ – 1350–1500 кг; связующее (цемент) 50–70 кг; вода затворения –

350 л. Прочность массива из твердых отходов из условия безопасности работы техники на его поверхности должна составлять 2–3 МПа для верхнего несущего слоя и 1,0–1,5 МПа для остальных слоев.

3. Предложена технология и технические средства для складирования отходов обогащения руд в поверхностные хвостохранилища с добавкой связующего использована ГП «УрНИПИпромтехнологии», Украина, в технико-экономическом обосновании строительства предприятия на базе месторождения ГП «Восточный горно-обогатительный комбинат», Украина. Так, при подземной добыче руды около 50–55% хвостов обогащения используют для закладки техногенных пустот, а остальную часть, соединенную с связующим материалом, складируют в поверхностные хранилища.

4. Показано, что при заполнении связанными хвостами всей существующей площади зеркала поверхностного хвостохранилища на высоту ~10 м продолжительность складирования составит более 50 лет. Рекомендовано сооружение водопроницаемого химически активного барьера, перекрывающего продукты выветривания кристаллических пород докембрия, в зоне которых идет значительная часть потока подземных вод. Существующий мониторинг гидрогеологической среды позволяет контролировать влияние поверхностных хвостохранилищ на водную среду региона.

Список литературы

1. Ломоносов Г.Г., Полоник П.И., Абдалах Х. Совершенствование технологии очистных работ на основе применения пастообразных закладочных материалов // Горный журнал. 2000. №2. С. 21–23.
2. Добыча и переработка урановых руд в Украине: монография / под общ. ред. А.П. Чернова. К.: Адеф–Украина, 2001. 238 с.
3. Твердеющие закладочные смеси повышенной плотности/ В.В. Квитка, В.Е. Сергеев, К. Троттер и др. (фирма GMSZ, Австралия) // Горный журнал. 2001. №5. С. 33–35.
4. Антонинова Н.Ю., Шубина Л.А. Использование техногенных отходов ГМК в природоохраных целях на предприятиях ГМК // Экология и промышленность России. 2015. № 10. С. 38–41.
5. Антонинова Н.Ю., Шубина Л.А. Об особенностях комплексного экологического анализа районов, испытывающих локальную техногенную нагрузку предприятий горно-металлургического комплекса // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21. № 2. С. 52–56.

6. Антонинова Н.Ю., Шубина Л.А. Возможности экологической реабилитации районов расположения зо-лоотвалов // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 3. С. 49–53.
7. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Закономерности формирования качества подземных вод на отработанных медноколчеданых рудниках Лёвихинского рудного поля (Средний Урал, Россия) // Геохимия. 2019. № 3. С. 282–299.
8. Ляшенко В.И., Голик В.И., Дятчин В.З. Складирование хвостов обогащения в виде твердеющих масс в подземном выработанном пространстве и хвостохранилище // Обогащение руд. 2020. № 1. С. 41–47.
9. Ляшенко В.И., Голик В.И., Дятчин В.З. Повышение экологической безопасности при снижении техногенной нагрузки в горнодобывающих регионах // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. №7. С. 529–538. DOI: 10.17073/0368-0797-2020-6-529-7
10. Экологическая и горнотехническая безопасность разработки месторождений в энергонарушенных горных массивах: проблемы и перспективы / Ляшенко В.И., Воробьев А.Е., Хоменко О.Е., Дудар Т.В. // Маркшейдерия и Недропользование. 2021. №3 (113). С. 43–55.
11. Оценка геомеханической и экологической безопасности разработки приповерхностных запасов руд в энергонарушенных массивах комплексными методами / Ляшенко В.И., Воробьев А.Е., Хоменко О.Е., Дудар Т.В. // Маркшейдерия и Недропользование. 2021. №5 (115). С. 37–45. <http://geomar-nedra.ru/issues-journal/journal-2021/625-contens-journal-2021-5.html>
12. Lyashenko V., Topolnij F., Dyatchin V. Development of technologies and technical means for storage of waste processing of ore raw materials in the tailings dams. Technology audit and production reserves. 2019.49 (3), 33–40. DOI: [http://dx.doi.org/10.15587/2312-8372-2019.49 \(3\), 33–40](http://dx.doi.org/10.15587/2312-8372-2019.49 (3), 33–40). <http://journals.uran.ua/tarp/article/view/184940/184920>.
13. Lyashenko, V., Khomenko, O., Topolnij, F., Golik, V. (2020). Development of natural underground ore mining technologies in energy distributed massifs. Technology Audit And Production Reserves, Vol. 1, №3(51), 10–17. doi: <http://dx.doi.org/10.15587/2312-8372.2020.195946>.
14. Lyashenko V., Khomenko O., Golik V., Topolny F., Helevera O. (2020). Underground of natural ornochal and resource-saving technology extinguished porozhnin under a digital ore drill. Technology Audit And Production Reserves. Vol. 2, №3(52), pp. 9–16. DOI: 10.15587/2312-8372.2020.200022. doi: <http://dx.doi.org/10.15587/2312-8372.2020>.
15. Ляшенко В.И., Пухальский В.Н. Повышение безопасности подземной разработки приповерхностных запасов месторождений сложной структуры // Безопасность труда в промышленности. 2016. №2. С. 36–41.
16. Ляшенко В.И., Пухальский В.Н. Обоснование безопасных параметров камер при подземной разработке приповерхностных запасов руд в энергонарушенных массивах // Маркшейдерия и Недропользование. 2021. №1 (111). С. 20–32.
17. Антонинова Н.Ю., Собенин А.В., Шубина Л.А. Оценка возможности использования промышленных отходов при формировании геохимических барьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 12. С. 78–88. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-78-88
18. Крупник Л.А., Шапошник Ю.Н., Шапошник С.Н. Разработка технологии закладочных работ на проектируемом Ново-Лениногорском руднике // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 8. С. 25–32.
19. Экологическая безопасность в зоне влияния уранового производства / Ляшенко В.И., Чекушина Т.В., Лисовой И.А., Лисовая Т.С. // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 3. С. 60–65. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-03-60-65.
20. Строительство хвостохранилища на медно-молибденовом руднике Лос-Пеламбрес в Чили. URL: <http://mineral.ru/News/34680.html> (дата обращения: 15.12.2021).
21. Clemens S. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants // Biochimie. 2006. Vol. 88. Pp. 1707–1719. 8. Bradl H.B. Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents // Journal of Colloid and Interface Science. 2004. Vol. 277. Pp. 1–18.
22. Rosenfeld C.E., Chaney R.L., Tappero R.V., Martínez C.E. Microscale investigations of soil heterogeneity: impacts on zinc retention and uptake in zinc-contaminated soils // Journal of Environmental Quality. 2017. Vol. 46. No 2. Pp. 373–383.
23. Ляшенко В.И., Голик В.И. Научное и конструкторско-технологическое сопровождение развития уранового производства. Достижения и задачи // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 7. С. 137–152. DOI: 10.25018/0236/14932017/7/0/137/152.
24. Lyashenko V., Khomenko O., Chekushina T., Topolnij F., Dudar T. (2020). Assessment of environmental and resource/saving technologies and technical means for processing and disposal of man/made formations and waste. Technology Audit and Production Reserves, 4/3(54), 21–28. DOI: 10.15587/2312/8372.2020.210666. <http://journals.uran.ua/tarp/article/view/210666/210944>.
25. Rosenfeld C.E., Chaney R.L., Martinez C.E. Soil geochemical factors regulate Cd accumulation by metal hyperaccumulating Noccaea caerulescens (J. Presl & C. Presl) FK Mey in field-contaminated soils // Science of the Total Environment. 2018. Vol. 616. Pp. 279–287.
26. Антонинова Н.Ю., Собенин А.В., Шубина Л.А. Оценка возможности использования промышленных

- отходов при формировании геохимических барьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 12. С. 78–88. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-78-88.
27. Ляшенко В.И. Природоохранные технологии освоения месторождений полезных ископаемых // Маркшейдерский вестник. 2015. № 1. С.10–15.
28. Ляшенко В.И. Развитие геомеханического мониторинга свойств и состояния массива горных пород при подземной разработке месторождений сложной структуры// Маркшейдерский вестник. 2016. № 1. С. 35–43.
29. Nekhunguni P.M., Tavengwa N.T., Tutu H. (2017). Sorption of uranium (VI) onto hydrous ferric oxide-modified zeolite: Assessment of the effect of pH, contact time, temperature, selected cations and anions on sorbent interactions. *Journal of Environmental Management*, 204, 571–582. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.034>
30. Jung H.B., Xu H., Konishi H., Roden E.E. Role of nano-goethite in controlling U(VI) sorption-desorption in subsurface soil. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, 169, 80–88. doi: <http://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.07.014>
31. Petlovanyi M., Kuzmenko O., Lozynskyi V., Popovych V., Sai K., & Saik, P. Review of man-made mineral formations accumulation and prospects of their developing in mining industrial regions in Ukraine. *Mining of Mineral Deposits*, 2019, 13(1), 24–38. <https://doi.org/10.33271/mining13.01.024>
32. Ляшенко В.И., Хоменко О.Е., Голик В.И. Развитие природоохранных и ресурсосберегающих технологий подземной добычи руд в энергонарушенных массивах // Горные науки и технологии. 2020, 5(2), 104–118. DOI: 10.17073/2500/0632/2020/2/104/118
33. Kovalchuk I., Tobilko V., Kholodko Yu., Zahorodniuk N., Kornilovich B. Purification of mineralized waters from U (VI) compounds using bentonite/iron oxide composites. // Technology audit and production reserves. 2020. Т. 3. № 3 (53). С. 12–18.
34. Сорбция тяжелых металлов фильтрующими модулями с вермикулит-сунгилитовыми продуктами / Мосендж И.А., Кременецкая И.П., Дробогужская С.В., Алексеева С.А. // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2020. Т. 23. № 2. С. 182–189.
35. Lyashenko V., Khomenko O., Topolnij F., & Helevera O. Substantiation of technologies and technical means for disposal of mining and metallurgical waste in mines. *Technology Audit and Production Reserves*, 2020, 3(3(53)), 4–11. DOI:10.15587/2706-5448.2020.200897, <http://dx.doi.org/10.15587/2312-8372.2020>
36. Lyashenko V., Khomenko O., Chekushina T., Topolnij F. Justification of safe underground development of mountain deposits of complex structure by geo-physical methods. *Technology Audit and Production Reserves*, 2020, 5/3(55), 9–18. DOI: 10.15587/2706-5448.2020.215737.
37. Blyuss B., Semenenko Ye., Medvedieva O., Kyrychko S., & Karatayev A. Parameters determination of hydromechanization technologies for the dumps development as technogenic deposits. *Mining of Mineral Deposits*, 2020, 14(1), 51–61. <https://doi.org/10.33271/mining14.01.051>
38. Moshynskyi V., Malanchuk Z., Tsymbaliuk V., Malanchuk L., Zhomyruk R., & Vasylchuk O. Research into the process of storage and recycling technogenic phosphogypsum placers. *Mining of Mineral Deposits*, 2020, 14(2), 95–102. <https://doi.org/10.33271/mining14.02.095>
39. Lyashenko V., Khomenko O., Chekushina T., Dudar T., Topolnij F. Substantiation of efficiency and environmental safety of leaching metals from ore: ways of development and prospects. *Technology Audit and Production Reserves*, 2021, 3/3(59), 19–26. DOI: 10.15587/2706-5448.2021.235288
40. Механохимическая технология извлечения железа из хвостов обогащения / Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Разоренов Ю.И., Масленников С.А., Ляшенко В.И. // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. №4. С. 282–291.

References

1. Lomonosov G.G., Polonik P.I., Abdalakh Kh. Improving the coal extraction technology by applying paste backfill materials. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2000, no. 2, pp. 21–23. (In Russ.)
2. Chernov A.P. *Dobycha i pererabotka uranovykh rud v Ukraine: monografiya* [Mining and processing uranium ores in Ukraine: monograph]. Kyiv: Adef–Ukraine, 2001, 238 p. (In Russ.)
3. Kvitka V.V., Sergeev V.E., Troter K. et al. Consolidating filling mixtures of high density (GMSZ, Australia). *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2001, no. 5, pp. 33–35. (In Russ.)
4. Antoninova N.Yu., Shubina L.A. The use of man-made waste from the mining and metallurgical complex for environmental purposes at the enterprises of the mining and metallurgical complex. *Ekologiya i promyshlennost Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2015, no. 10, pp. 38–41. (In Russ.)
5. Antoninova N.Yu., Shubina L.A. On the features of a comprehensive ecological analysis of areas experiencing a local man-made load of mining and metallurgical enterprises. *Ekologiya i promyshlennost Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2017, vol. 21, no. 2, pp. 52–56. (In Russ.)
6. Antoninova N.Yu., Shubina L.A. Possibilities of ecological rehabilitation of the ash dump areas. *Ekologiya i promyshlennost Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2019, vol. 23, no. 3, pp. 49–53. (In Russ.)

7. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A. Regularities of the formation of groundwater quality in the waste copper pyrite mines of the Levikha ore field (the Middle Urals, Russia). *Geokhimiya* [Geochemistry], 2019, no. 3, pp. 282–299. (In Russ.)
8. Lyashenko V.I., Golik V.I., Dyatchin V.Z. Storage of dressing tailings in the form of solidifying masses in the underground mined-out areas and tailing dump. *Obozgashchenie rud* [Processing of ores], 2020, no. 1, pp. 41–47. (In Russ.)
9. Lyashenko V.I., Golik V.I., Dyatchin V.Z. Improving environmental safety, while reducing man-made load in mining regions. *Izvestiya vyzov. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy]. 2020, vol. 63, no. 7, pp. 529–538. DOI: 10.17073 / 0368-0797-2020-6-529-7
10. Lyashenko V.I., Vorobiev A.E., Khomenko O.E., Dudar T.V. Environmental and mining safety of developing deposits in energy disturbed mountain massifs: problems and prospects. *Marksheideriya i nedropolzovanie* [Mine Surveying and Subsoil Use], 2021, no. 3 (113), pp. 43–55. (In Russ.)
11. Lyashenko V.I., Vorobiev A.E., Khomenko O.E., Dudar T.V. Assessment of geomechanical and ecological safety of development of near-surface ore reserves in energy disturbed massifs using integral methods. *Marksheideriya i nedropolzovanie* [Mine Surveying and Subsoil Use], 2021, no. 5 (115), pp. 37–45. (In Russ.) Available at: <http://geomar-nedra.ru/issues-journal/journal-2021/625-contens-journal-2021-5.html>
12. Lyashenko V., Topolnij F., Dyatchin V. Development of technologies and technical means for storage of waste processing of ore raw materials in the tailings dams. Technology Audit and Production Reserves. 2019, no. 49 (3), pp. 33–40. doi:10.15587/2312-8372.2019.184940. Available at: <http://journals.uran.ua/tarp/article/view/184940/184920>
13. Lyashenko V., Khomenko O., Topolnij F., Golik V. Development of natural underground ore mining technologies in energy distributed massifs. Technology Audit and Production Reserves. 2020, vol. 1, no. 3(51), 10–17. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.195946>
14. Lyashenko V., Khomenko O., Golik V., Topolny F., Helevera O. (2020). Substantiation of environmental and resource-saving technologies for void filling under underground ore mining. Technology Audit and Production Reserves. 2020, vol. 2, no. 3(52), pp. 9–16. doi: <http://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.200022>
15. Lyashenko V.I., Pukhalskiy V.N. Improving safety of underground mining of near-surface reserves of deposits of a complex structure. Occupational Safety in Industry, 2016, no. 2, pp. 36–41. (In Russ.)
16. Lyashenko V.I., Pukhalskiy V.N. Rationale for safe parameters of chambers during underground mining of near-surface ore reserves in disturbed massifs. *Marksheideriya i nedropolzovanie* [Mine Surveying and Subsoil Use], 2021, no. 1 (111), pp. 20–32. (In Russ.)
17. Antoninova N.Yu., Sobenin A.V., Shubina L.A. Assessment of the possibility of using industrial waste in the formation of geochemical barriers. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. 2020, no. 12, pp. 78–88. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-78-88.
18. Krupnik L.A., Shaposhnik Yu.N., Shaposhnik S.N. Development of the backfilling technology at the designed Novo-Leninogorsky mine. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2015, no. 8, pp. 25–32. (In Russ.)
19. Lyashenko V.I., Chekushina T.V., Lisovoy I.A., Lissovaya T.S. Environmental safety in the zone of influence of uranium production. *Ekologiya i promyshlennost Rossii* [Ecology and Industry of Russia]. 2019, vol. 23, no. 3, pp. 60–65. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-03-60-65.
20. Construction of a tailing dump at the Los Pelambres copper-molybdenum mine in Chile. Available at: <http://mineral.ru/News/34680.html> (Accessed on December 15, 2021).
21. Clemens S. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie*. 2006, vol. 88, pp. 1707–1719. 8. Bradl H.B. Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004, vol. 277, pp. 1–18.
22. Rosenfeld C.E., Chaney R.L., Tappero R.V., Martínez C.E. Microscale investigations of soil heterogeneity: impacts on zinc retention and uptake in zinc-contaminated soils. *Journal of Environmental Quality*. 2017, vol. 46, no. 2, pp. 373–383.
23. Lyashenko V.I., Golik V.I. Scientific and design-technology support for the development of uranium production. Achievements and objectives. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. 2017, no. 7, pp. 137–152. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-7-0-137-152.
24. Lyashenko V., Khomenko O., Chekushina T., Topolnij F., Dudar T. Assessment of environmental and resource-saving technologies and technical means for processing and disposal of man-made formations and waste. Technology Audit and Production Reserves. 2020, 4/3(54), 21–28. DOI: 10.15587/2312-8372.2020.210666
25. Rosenfeld C.E., Chaney R.L., Martinez C.E. Soil geochemical factors regulate Cd accumulation by metal hyperaccumulating *Noccaea caerulescens* (J. Presl & C. Presl) F.K. Mey in field-contaminated soils. *Science of the Total Environment*. 2018, vol. 616, pp. 279–287.
26. Antoninova N.Yu., Sobenin A.V., Shubina L.A. Assessment of the possibility of using industrial waste in the formation of geochemical barriers. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. 2020, no. 12, pp. 78–88. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-78-88.

27. Lyashenko V.I. Environmental technologies for the development of mineral deposits. *Marksheyderskiy vestnik* [Mine Surveying Bulletin], 2015, no. 1, pp. 10–15. (In Russ.)
28. Lyashenko V.I. Development of geomechanical monitoring of the properties and state of the rock mass in the underground mining of deposits of complex structure. *Marksheyderskiy vestnik* [Mine Surveying Bulletin], 2016, no. 1, pp. 35–43. (In Russ.)
29. Nekhunguni P.M., Tavengwa N.T., Tutu H. Sorption of uranium (VI) onto hydrous ferric oxide-modified zeolite: Assessment of the effect of pH, contact time, temperature, selected cations and anions on sorbent interactions. *Journal of Environmental Management*. 2017, 204, 571–582. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.034>
30. Jung H.B., Xu H., Konishi H., Roden E.E. Role of nano-goethite in controlling U(VI) sorption-desorption in subsurface soil. *Journal of Geochemical Exploration*. 2016, 169, 80–88. doi: <http://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.07.014>
31. Petlovanyi M., Kuzmenko O., Lozynskyi V., Popovych V., Sai K. & Saik P. Review of man-made mineral formations accumulation and prospects of their developing in mining industrial regions in Ukraine. *Mining of Mineral Deposits*, 2019, 13(1), 24–38. <https://doi.org/10.33271/mining13.01.024>
32. Lyashenko V.I., Khomenko O.E., Golik V.I. Development of environmental and resource-saving technologies for underground mining of ores in energy disturbed massifs. *Gornye nauki i tekhnologii* [Mining Science and Technology]. 2020, 5(2), 104–118. DOI: 10.17073/2500-0632/2020/2/104/118.
33. Kovalchuk I., Tobilko V., Kholodko Yu., Zahorodniuk N., Kornilovich B. Purification of mineralized waters from U (VI) compounds using bentonite/iron oxide composites. *Technology Audit and Production Reserves*. 2020, vol. 3, no. 3 (53), pp. 12–18.
34. Mosendz I., Kremenetskaya I., Drogobuzhskaya S., Alekseeva S. Sorption of heavy metals by filter modules with vermiculite-sungulite products. *Vestnik MGTU*. [Vestnik of Murmansk State Technical University], 2020, vol. 23, no. 2, pp. 182–189. (In Russ.)
35. Lyashenko V., Khomenko O., Topolnij F., & Helevera O. Substantiation of technologies and technical means for disposal of mining and metallurgical waste in mines. *Technology Audit and Production Reserves*, 2020, 3(53)), 4–11. doi:10.15587/2706-5448.2020.200897, <http://dx.doi.org/10.15587/2312-8372.2020>
36. Lyashenko V., Khomenko O., Chekushina T., Topolnij F. Justification of safe underground development of mountain deposits of complex structure by geophysical methods. *Technology Audit and Production Reserves*. 2020, 5/3(55), 9–18. DOI: 10.15587/2706-5448.2020.215737.
37. Blyuss B., Semenenko Ye., Medvedieva O., Kyrychko S. & Karatayev A. Parameters determination of hydro-mechanization technologies for the dumps development as technogenic deposits. *Mining of Mineral Deposits*, 2020, 14(1), 51–61. <https://doi.org/10.33271/mining14.01.051>
38. Moshynskyi V., Malanchuk Z., Tsymbaliuk V., Malanchuk L., Zhomyruk R. & Vasylchuk O. Research into the process of storage and recycling technogenic phosphogypsum placers. *Mining of Mineral Deposits*, 2020, 14(2), 95–102. <https://doi.org/10.33271/mining14.02.095>
39. Lyashenko V., Khomenko O., Chekushina T., Dudar T., Topolnij F. Substantiation of efficiency and environmental safety of leaching metals from ore: ways of development and prospects. *Technology Audit and Production Reserves*, 2021, 3/3(59), 19–26. DOI: 10.15587/2706-5448.2021.235288
40. Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Razorenov Yu.I., Maslennikov S.A., Lyashenko V.I. Mechanochemical technology of iron extraction from concentration tailings. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 2021, vol. 64, no. 4, pp. 282–291. (In Russ.)

Поступила 23.11.2021; принята к публикации 16.12.2021; опубликована 25.03.2022
Submitted 23/11/2021; revised 16/12/2021; published 25/03/2022

Ляшенко Василий Иванович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник научно-исследовательского отдела, Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии, Желтые Воды, Украина.
Email: vilyashenko2017@gmail.com

Воробьев Александр Егорович – доктор технических наук, профессор, проректор по научной деятельности и инновациям, Атырауский университет нефти и газа, Атырау, Республика Казахстан.
Email: fogel_al@mail.ru

Хоменко Олег Евгеньевич – доктор технических наук, профессор кафедры горной инженерии и образования, Национальный технический университет «Днепровская политехника», Днепр, Украина.
Email: rudana.in.ua@gmail.com

Дудар Тамара Викторовна – доктор технических наук, старший научный сотрудник, доцент, заведующая кафедрой экологии, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.
Email: dudar@nau.edu.ua

Vasiliy I. Lyashenko – PhD (Eng.), Senior Researcher, Head of the Research Department,
State Enterprise Ukrainian Research and Design Institute of Industrial Technology, Zhovti Vody, Ukraine.
Email: vilyashenko2017@gmail.com

Aleksandr E. Vorobev – DrSc (Eng.), Professor, Vice-Rector for Research
and Innovations, Atyrau University of Oil and Gas, Atyrau, Kazakhstan.
Email: fogel_al@mail.ru

Oleg E. Khomenko – DrSc (Eng.), Professor of the Department of Mining Engineering and Education,
National Technical University Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.
Email: rudana.in.ua@gmail.com

Tamara V. Dudar – DrSc (Eng.), Senior Researcher, Associate Professor,
Head of the Environmental Sciences Department, National Aviation University, Kyiv, Ukraine.
Email: dudar@nau.edu.ua