

Оригинальная статья / Original article

УДК: 669.213

DOI: 10.21285/2541-9455-2017-40-3-107-117

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ БИОПАССИВНОЙ ДЕТОКСИКАЦИИ СКЛАДИРУЕМЫХ ОТХОДОВ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА

© М.П. Белых<sup>а</sup>, А.Ю. Чикин<sup>б</sup>, С.В. Петров<sup>с</sup>, Н.Л. Белькова<sup>д</sup>

<sup>а,с</sup>АО «Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов»,  
Российская Федерация, 664025, г. Иркутск, Бульвар Гагарина, 38.

<sup>а,б</sup>Иркутский государственный университет,

Российская Федерация, 664011, г. Иркутск, ул. Нижняя Набережная, 6.

<sup>д</sup>Лимнологический институт СО РАН,

Российская Федерация, 664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3.

**РЕЗЮМЕ. Цель.** Для решения экологических задач детоксикации цианидсодержащих отходов кучного выщелачивания (КВ) золота, продолжительность обезвреживания которых не является лимитирующей, особый интерес представляют процессы биопассивной детоксикации, основанные на самопроизвольном разложении цианидов под действием природных факторов, включая деятельность автохтонного бактериального сообщества. Целью работы является разработка технологии биопассивной детоксикации складированных отходов КВ. **Методы.** Для моделирования процесса пассивной детоксикации складированных отходов КВ золота проводили длительный эксперимент по хранению рудной массы в условиях зонирования рудного штабеля КВ. Содержание токсичных соединений в рудной массе исследовали химическим анализом по стандартным методикам. **Результаты.** Определено, что в процессе пассивной детоксикации рудного штабеля КВ золота биохимические процессы доминируют над простым химическим окислением. Для основных токсичных соединений (тиоцианатов и цианидов, включая цианидные комплексы меди и никеля) были рассчитаны аппроксимирующие уравнения биодеградации. На примере промышленной площадки КВ месторождения Республики Саха (Якутия) разработана технология биопассивной детоксикации складированных отходов КВ. Рассчитаны водный баланс установки КВ, продолжительность операции обезвреживания основной массы рудного штабеля, и разработаны технологическая и аппаратурная схемы предлагаемой технологии. **Выводы.** Предлагаемая технология не требует затрат на обезвреживание реагентов и базируется на высокой экономической и экологической эффективности по сравнению с традиционной химической технологией. Введение дополнительных мероприятий по модернизации отделения орошения, а также по уборке и вывозу снега будет проводиться при минимальных капитальных и эксплуатационных затратах. Ожидаемый экономический эффект применения технологии биопассивной детоксикации площадки КВ золота составляет 151429,7 тыс. руб.

---

<sup>а</sup>Белых Марина Петровна, аспирант кафедры технологий предпринимательства и методик их преподавания Педагогического Института ИГУ, младший научный сотрудник АО «Иргиредмет», e-mail: belykhmarina606@gmail.com

Marina P. Belykh, Postgraduate student of the Department of Entrepreneurship Technologies and Their Teaching Methodologies of the Teacher's Training Institute of Irkutsk State University, Junior Researcher of IRGIREDMET JSC, e-mail: belykhmarina606@gmail.com

<sup>б</sup>Чикин Андрей Юрьевич, доктор технических наук, профессор кафедры технологий предпринимательства и методик их преподавания Педагогического Института, тел.: (3952) 683248, e-mail: anchik53@mail.ru

Andrei Yu. Chikin, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Entrepreneurship Technologies and Their Teaching Methodologies of the Teacher's Training Institute of Irkutsk State University, tel.: (3952) 683248, e-mail: anchik53@mail.ru

<sup>с</sup>Петров Сергей Владимирович, кандидат технических наук, заведующий лабораторией охраны окружающей среды, тел.: (3952) 728729, доб. 1180, e-mail: svpetrov@mail.ru

Sergei V. Petrov, Candidate of technical sciences, Head of the environmental Management Laboratory, tel.: (3952) 728729, ext. 1180, e-mail: svpetrov@mail.ru

<sup>д</sup>Белькова Наталья Леонидовна, кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник Лаборатории аналитической биоорганической химии, тел.: (3952) 511874, e-mail: belkova@lin.irk.ru

Natalia L. Belkova, Candidate of Biology, Associate Professor, Senior Researcher of the Laboratory of Analytical Bioorganic Chemistry, tel.: (3952) 511874, e-mail: belkova@lin.irk.ru

*Ключевые слова:* кучное выщелачивание золота, цианидсодержащие отходы, биопассивная детоксикация, складированные отходы кучного выщелачивания, биологическая активность, автохтонные бактериальные сообщества.

**Формат цитирования:** Белых М.П., Чикин А.Ю., Петров С.В., Белькова Н.Л. Разработка технологии биопассивной детоксикации складированных отходов кучного выщелачивания золота // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2017. Т. 40. № 3. С. 107–117. DOI: 10.21285/2541-9455-2017-40-3-107-117

## DEVELOPMENT OF PASSIVE DETOXIFICATION TECHNOLOGY FOR GOLD HEAP LEACH STOCKPILED WASTES

**M.P. Belykh, A.Yu. Chikin, S.V. Petrov, N.L. Belkova**

Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds JSC,  
38 Gagarin blvd., Irkutsk 664025, Russia  
Irkutsk State University,  
6 Nizhnyaya Naberezhnaya St., Irkutsk 664011, Russia  
Limnological Institute SB RAS,  
3 Ulan-Batorskaya St., Irkutsk 664033, Russia

**ABSTRACT. Purpose.** The processes of biopassive detoxication are of special interest for the solution of environmental issues of detoxification of gold heap leach cyanide-bearing wastes whose detoxification period is unlimited. These processes are based on spontaneous degradation of cyanides under the influence of natural factors including the action of autochthonous bacterial community. The purpose of the work is to develop a biopassive detoxification technology of heap leach stockpiled wastes. **Methods.** A long-term experiment on ore mass storage under the conditions of heap leach ore pile zoning has been carried out in order to model the process of passive detoxification of gold heap leach stockpiled wastes. The content of toxic compounds in the ore mass has been determined using a chemical analysis based on standard procedures. **Results.** It is found that biochemical processes dominate over simple chemical oxidation during passive detoxification of the gold heap leach ore pile. Approximating biodegradation equations have been calculated for the major toxic compounds (thiocyanates and cyanides including copper and nickel cyanide complexes). The technology of biopassive detoxification of heap leach stockpiled wastes has been developed at an industrial heap leach site of the Sakha Republic (Yakutia) deposit. Water balance of the heap leach installation and detoxification time for the major mass of the ore pile have been calculated. Process circuit and process flow diagram of the proposed technology have been developed. **Conclusions.** The introduced technology eliminates the costs for reagent detoxification and is based on high economic and environmental efficiency as compared to conventional chemical technology. Introduction of additional modernizations of the irrigation circuit as well as removal and transportation of snow will be carried out at low capital and operational costs. The expected economic potential of the technology of biopassive detoxification of gold heap leach site will be 151429.7 thousand roubles.

*Keywords:* gold heap leaching, cyanide-bearing wastes, biopassive detoxication, stockpiled heap leach wastes, biological activity, autochthonous bacterial communities

**For citation:** Belykh M.P., Chikin A.Yu., Petrov S.V., Belkova N.L. Development of passive detoxification technology for gold heap leach stockpiled wastes. Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits, 2017, vol. 40, no. 3, pp. 107–117. (In Russian). DOI: 10.21285/2541-9455-2017-40-3-107-117

### Введение

На сегодняшний день цианистый процесс является основой современной металлургии золота [1, 2]. Одним из методов извлечения золота с использованием цианистого процесса выступает технология кучного выщелачивания (КВ),

которая широко используется на золотодобывающих предприятиях Российской Федерации. Технологический процесс КВ проводится при естественных условиях на открытом воздухе в отсутствие фабричных корпусов [1, 3]. В результате образуются токсичные отходы – отработанный

ный рудный штабель и технологический раствор.

В России мероприятия по детоксикации отходов КВ преимущественно основаны на химических методах, которые являются эффективными, но не исключают повторного загрязнения окружающей среды используемыми реагентами, а также требуют больших капитальных и эксплуатационных затрат [4]. За рубежом большое внимание исследователей направлено на выделение активных бактериальных штаммов-деструкторов и использование их в биодетоксикации цианидсодержащих отходов. Применение подобных мероприятий для обезвреживания отходов КВ месторождений, расположенных на территории Российской Федерации, сталкивается с проблемами поддержания активности изолированных штаммов при резких сезонных колебаниях температур и преодоления ограничений деструкции цианидов в высоких концентрациях.

Для решения экологических задач детоксикации отходов КВ золота, продолжительность обезвреживания которых не является лимитирующей, особый интерес представляют процессы биопассивной детоксикации, основанные на самопроизвольном разложении цианидов под действием природных факторов, включая деятельность автохтонного бактериального сообщества. Внедрение такой безреагентной технологии для обезвреживания отработанных установок КВ позволит достичь значимого экономического эффекта и снизить экологическую нагрузку на районы размещения промышленных объектов. Исходя из этого целью данного исследования стала разработка технологии биопассивной детоксикации складированных отходов КВ.

#### **Материалы и методы исследования**

В 2014 году были отобраны пробы технологического раствора и руды

действующего рудного штабеля КВ золота одного из месторождений Республики Саха (Якутия). Руду промывали технологическим раствором для выравнивания химического состава влаги рудной массы и делили на две равные части. Одну часть использовали в эксперименте как нестерильный образец, содержащий автохтонное бактериальное сообщество. Вторую часть стерилизовали [5] и использовали в качестве контроля, исключающего биодеградацию. Химический анализ влаги рудных масс проводили с использованием методов, описанных в работах [5, 6]. Влага рудных масс нестерильного и стерильного образцов содержала высокие концентрации цианидов, тиоцианатов и тяжелых металлов (алюминий, мышьяк, кобальт, медь, железо и никель) (табл. 1).

В складированном рудном штабеле КВ условно выделяют четыре слоя, которые различаются по температурному режиму, наличию или отсутствию аэрации [4, 5]. На основании этого для разработки технологии биопассивной детоксикации стерильные и нестерильные образцы хранили в четырех разных модельных экспериментах – слой 2 (летний период: +20°C, +O<sub>2</sub>, зимний период: -18°C, +O<sub>2</sub>), слой 3 (+4°C, +O<sub>2</sub>) и слой 4 (+4°C, -O<sub>2</sub>), которые соответствовали условиям, создаваемым в рудном штабеле КВ во время его складирования на промышленной площадке. Из-за незначительной мощности и несущественного влияния на деструкцию токсичных соединений [4] слой 1 был исключен из анализа.

Во время хранения образцов в условиях модельных экспериментов (593 сут.) отбор проб для химического анализа проводили раз в два месяца. Концентрацию токсичных веществ во влаге рудной массы исследовали с помощью метода водных и щелочных вытяжек [4]. Определение содержания цианидов (CN<sup>-</sup>) и тиоцианатов (SCN<sup>-</sup>) проводили в щелочной

**Таблица 1**

**Химический состав влаги рудной массы нестерильного и стерильного образцов**  
**Table 1**

**Chemical composition of nonsterile and sterile sample ore mass moisture**

Определяемые компоненты / Analyte components	Нестерильный образец / Nonsterile sample	Стерильный образец / Sterile sample	ПДК* / MAC*
pH	10,9	8,9	
Концентрация, мг/л / Concentration, mg/l			
Кальций / Calcium	173,25	488,2	180,0
Сульфаты / Sulfates	932,9	1308,3	100,0
Магний / Magnesium	7,41	16,7	300,0
Цианиды / Cyanides	81,6	85,9	0,05
Тиоцианаты / Thiocyanates	13,3	15,6	0,09
Алюминий / Aluminum	1,42	0,21	0,04
Мышьяк / Arsenic	1,33	1,07	0,05
Кобальт / Cobalt	0,20	0,27	0,01
Медь / Copper	20,32	16,89	0,001
Железо / Iron	0,5	0,67	0,1
Никель / Nickel	0,5	0,35	0,001

*Примечание.* ПДК\* – предельно допустимые концентрации.

*Note.* MAC\* – maximum allowable concentration.

вытяжке для исключения потерь цианида в газовую фазу в виде синильной кислоты. Концентрацию нелетучих токсичных веществ исследовали в водной вытяжке, приготовленной на стерильной дистиллированной воде. Химический анализ проводили по стандартным методикам, описанным в источнике [4].

Расчет водного баланса установки КВ золота исследуемого месторождения проводили в соответствии с работами С.В. Петрова и И.Н. Бронштейна [4, 7]. Продолжительность операции обезвреживания основной массы рудного штабеля КВ рассчитывали с помощью аппроксимирующих уравнений биодеградации основных токсичных соединений, полученных в ходе лабораторных исследований (модельных экспериментов).

#### **Результаты исследования и их обсуждение**

В результате проведенных модельных экспериментов было показано, что наиболее интенсивная деструкция цианидов (на 98,9 и 99,3%) происходила при

положительных температурах и наличии аэрации – слой 2 (летний период) и слой 3 (табл. 2). При этом в присутствии автохтонного бактериального сообщества скорость деструкции цианидов (с 81,6 мг CN<sup>-</sup>/л до значений ПДК) составляла 1,26 и 0,58 мг/л в сутки, что в 4 и 6 раз выше по сравнению со стерильным образцом. Также, как и для цианидов, снижение концентраций меди и никеля в нестерильной рудной массе было на порядок выше, чем в предварительно простерилизованной (см. табл. 2). Дополнительно была отмечена корреляция деструкции цианидов со снижением концентрации меди и никеля. Это свидетельствовало о том, что в исследуемой рудной массе данные металлы преимущественно находятся в виде растворимых цианидных комплексов.

Уменьшение концентрации тиоцианатов отмечали только в условиях отрицательных температур слоя 2 (зимний период). При этом в нестерильной рудной массе интенсивность деструкции была

Таблица 2

**Деструкция токсичных соединений при культивировании  
в модельных условиях зонирования рудного штабеля КВ**

Table 2

**Degradation of toxic compounds under cultivation  
in model zoning conditions of the heap leach (HL) ore stockpile**

Образец / Sample	Слой 2 летний период (+20°C, +O <sub>2</sub> ) / Layer 2 summer season (+20°C, +O <sub>2</sub> )		Слой 2 зимний период (-18°C, +O <sub>2</sub> ) / Layer 2 winter season (-18°C, +O <sub>2</sub> )		Слой 3 (+4, +O <sub>2</sub> ) / Layer 3 (+4,+O <sub>2</sub> )		Слой 4 (+4°C, -O <sub>2</sub> ) / Layer 4 (+4°C, -O <sub>2</sub> )	
	1*	2**	1	2	1	2	1	2
Цианиды, мг/л / Cyanides, mg/l								
Нестерильный / Nonsterile	98,9	1,26	33,7	0,05	99,3	0,58	96,2	0,13
Стерильный / Sterile	98,0	0,33	16,2	0,02	74,1	0,11	42,8	0,06
Тиоцианаты, мг/л / Thiocyanates, mg/l								
Нестерильный / Nonsterile	НУ*** / NR		67,7	0,02	НУ / NR		н.у	
Стерильный / Sterile	НУ / NR		9,2	<0,002	НУ / NR		н.у.	
Медь (в цианидных комплексах), мг/л / Copper (in cyanide complexes), mg/l								
Нестерильный / Nonsterile	98,9	0,31	31,7	0,01	98,8	0,03	94,4	0,03
Стерильный / Sterile	97,9	0,03	НУ / NR		НУ / NR		НУ / NR	
Никель (в цианидных комплексах), мг/л / Nickel (in cyanide complexes), mg/l								
Нестерильный / Nonsterile	100	0,01	НУ / NR		94,2	0,001	39,6	<0,001
Стерильный / Sterile	100	0,001	НУ / NR		НУ / NR		НУ / NR	

*Примечание.* 1\* – процент удаления токсичных соединений за время проведения эксперимента (593 сут.); 2\*\* – удаление токсичных соединений за сутки, мг/л; НУ\*\*\* – нет удаления токсичного соединения.

*Note.* 1\* – percentage of toxic compound removal within the test period (593 days); 2\*\* – removal of toxic compounds per day, mg/l; NR\*\*\* – no removal of toxic compounds.

выше (67,7%), чем в предварительно простерилизованной (9,2%) (см. табл. 2).

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о доминировании биохимических процессов в пассивной детоксикации рудного штабеля КВ золота по сравнению с простым химическим окислением. На основании полученных параметров для основных токсичных соединений (тиоцианатов и цианидов, включая

цианидные комплексы меди и никеля) рассчитаны аппроксимирующие уравнения биодegradации (табл. 3), которые позволили прогнозировать поведение токсичных соединений в рудном штабеле и далее были использованы для пересчета на реальные отходы КВ.

При разработке технологии биопассивной детоксикации цианидсодержащих отходов КВ золота одного из месторож-

**Таблица 3**

**Аппроксимирующие уравнения биодegradации основных токсичных соединений**

**Table 3**

**Approximating biodegradation equations of major toxic compounds**

Токсичные соединения / Toxic compounds	Период обезвреживания / Detoxification period	Аппроксимирующее уравнение деградации / Approximating degrada- tion equation	Достоверность аппроксимации / Approximation validity
Цианиды (включая цианидные комплексы Cu и Ni) / Cyanides (including Cu and Ni cyanide complexes )	Летний период / Summer season	$\frac{\ln 81,63 - \ln C}{0,012} = t$	0,9507
Цианиды (включая цианидные комплексы Cu и Ni) / Cyanides (including Cu and Ni cyanide)	Зимний период / Winter season	$\frac{\ln 81,63 - \ln C}{0,008} = t$	0,7172
Тиоцианаты / Thiocyanates	Зимний период / Winter season	$\frac{\ln 13,3 - \ln C}{0,002} = t$	0,8673

*Примечание.* C – концентрации цианидов и тиоцианатов в заданной точке, мг/л; t – скорости деструкции цианидов и тиоцианатов, сут.

*Note.* C – concentrations of cyanides and thiocyanates in the given point, mg/l; t – cyanides and thiocyanates destruction rates, day.

дений Республики Саха (Якутия) проводили расчет водного баланса установки КВ для определения способа утилизации излишек вод отработанных технологических растворов.

К основным объектам площадки КВ, которые задействованы в формировании водного баланса, относят рудный штабель и пруды-накопители. По данным технологического регламента рудный штабель установки КВ изучаемого месторождения, подлежащий сезонному обезвреживанию, содержал 200000 т руды. Насыпная плотность руды составляла 1,63 т/м<sup>3</sup>. Угол естественного откоса рудного штабеля КВ – 36°, а высота штабеля – 8 м. Рудный штабель имел форму усеченной пирамиды, соотношение сторон которого было равно 1,5:1. В соответствии с источниками [4, 7] были определены основные размеры рудного штабеля и вычислена площадь установки КВ, соприкасающаяся с атмосферой, которая составила 19362,26 м<sup>2</sup>. Помимо рудного

штабеля учитывали систему накопительных прудов общей площадью 4485,9 м<sup>2</sup>.

Водный баланс установки КВ рассчитывали с учетом основных характеристик объектов площадки КВ, а также характеристик осадков и испарения с открытой водной поверхности в районе расположения объекта. Для ликвидации излишек вод рекомендуется проводить мероприятия по уборке и вывозу снега за пределы промышленной площадки. В летний период следует провести модернизацию отделения орошения с использованием оросительной системы с вращающимися эмиттерами типа Wobbler (Senninger Irrigation Inc., США) для интенсификации испарения воды. Разность между испарением с открытой поверхности воды и поверхности установки КВ с предполагаемым орошением характеризуется эмпирическим коэффициентом, равным 1,2. На основании полученных данных был рассчитан водный баланс основных объектов площадки КВ изучае-

мого месторождения. При этом система «рудный штабель – пруды-накопители» исследуемого месторождения имела отрицательный водный баланс, в котором испарение из системы превышает осадки на 209,1 м<sup>3</sup> за теплый период (май – сентябрь). При орошении штабеля КВ оборотными дренажными водами возникает возможность полностью ликвидировать технологические растворы в течение одного сезона (150 сут.). Талые воды не будут образовываться за счет мероприятий по вывозу снега с площадки КВ. Несмотря на то, что данные параметры были рассчитаны для одного рудного штабеля КВ (200000 т), полученные результаты можно перенести на весь комплекс установок КВ.

Рассчитанные при лабораторных исследованиях аппроксимирующие уравнения позволили провести расчет продолжительности детоксикации основных токсичных соединений в отходах КВ в летний и зимний период. На основании полученных результатов (табл. 4) уже в конце второго года можно наблюдать обезвреживание цианидов до 0,07 мг/л. Однако с учетом длительности процесса деструкции тиоцианатов рекомендовано продлить продолжительность биопассивной детоксикации рудного штабеля КВ до трех лет. Это позволит снизить концен-

трации SCN<sup>-</sup> до значений ПДК. После трех лет пассивной биодетоксикации оставшиеся соединения в рудном штабеле КВ не будут оказывать существенного влияния на экологическую обстановку района размещения предприятия.

На основании полученных результатов исследования для промышленной площадки КВ (с 4 рудными штабелями по 200000 т) были рассчитаны основные технологические параметры предлагаемой технологии биопассивной детоксикации: плотность орошения 1 м<sup>2</sup> поверхности штабеля – 190 л/сут.; периодичность орошения при импульсном режиме – 1–6 сут. (по мере накопления растворов); продолжительность обезвреживания – 1095,0 суток; продолжительность операции испарения технологических растворов и дренажных вод за первый теплый сезон обезвреживания – 150 сут. Дополнительно были разработаны технологическая и аппаратурная схемы. Аппаратурная схема представлена на рисунке.

Процесс биопассивной детоксикации предлагается начинать в теплый период на следующий год после прекращения операции выщелачивания золота. В соответствии с аппаратурной схемой технологические растворы и дренажи испаряются в системе, состоящей из рудного штабеля и прудов-накопителей

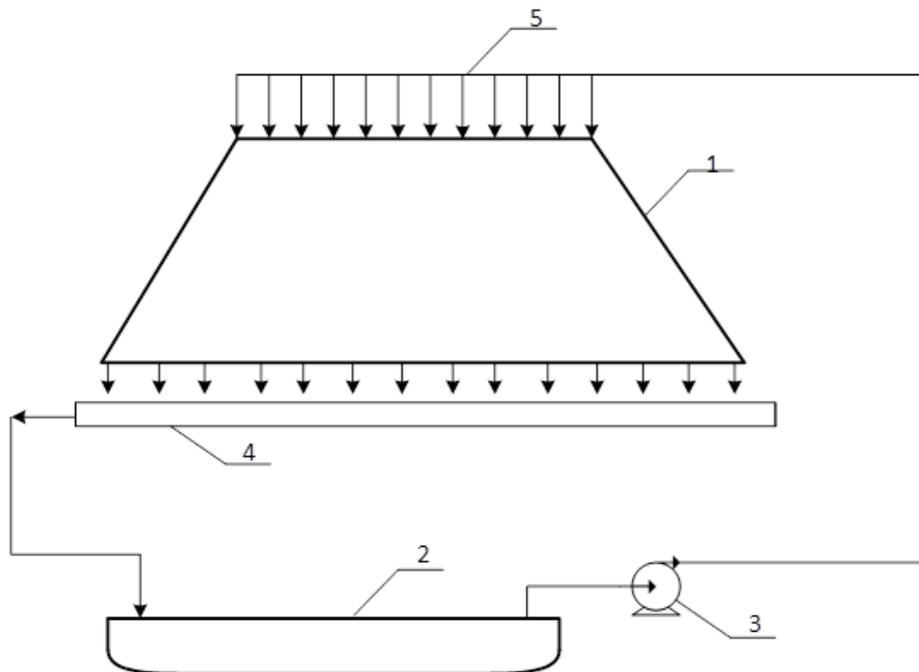
**Таблица 4**

**Результаты расчетов продолжительности обезвреживания цианидов,  
включая цианидные комплексы меди и никеля**

**Table 4**

**Calculation results of the cyanide detoxification period  
including copper and nickel cyanide complexes**

Продолжительность / Duration	Исходная концентрация, мг/л / Initial concentration, mg/l	Летний период / Summer season	Зимний период / Winter season
		Конечные концентрации, мг/л / Final concentrations, mg/l	
Первый год / First year	81,63	13,49	2,41
Второй год / Second year	2,41	0,4	0,07
Третий год / Third year	0,07	0,01	0,002



**Аппаратурная схема процесса биопассивной детоксикации рудного штабеля  
КВ золота с модернизированным отделением орошения:**

1 – рудный штабель; 2 – пруд-накопитель; 3 – насос; 4 – система сбора дренажа;  
5 – оросительная система с эмиттерами типа Wobblers

**Process flow diagram of bio-passive detoxification  
of heap leaching gold ore stockpile with a modernized irrigation circuit:**  
1 – ore stockpile; 2 – gathering pond; 3 – pump; 4 – drainage collection system;  
5 – irrigation system with Wobblers-type emitters

(см. рисунок). Подача промывных вод на рудный штабель (1) осуществляется насосом (3). Орошение рудного штабеля происходит с помощью оросительной системы с эмиттерами типа Wobblers (5). Сбор дренажей проводится дренажной системой (4), по которой воды поступают в пруд-накопитель (2). В процессе проводимых мероприятий необходимо обеспечить уборку и вывоз снега, контроль за протеканием процесса биодетоксикации, а также проводить мониторинг состояния окружающей среды.

Содержание основных токсичных соединений рудного штабеля КВ до и после биопассивной детоксикации представлено в табл. 5. Состав отходов удовлетворяет нормам нормативно допустимых сбросов для практически любых районов расположения предприятий,

эксплуатирующих технологию КВ. После трех лет детоксикации оставшиеся соединения в рудном штабеле КВ не будут оказывать существенного влияния на окружающую среду.

Разработанная технология КВ базируется на высокой экономической и экологической эффективности по сравнению с традиционной химической технологией (щелочное хлорирование с последующей купоросной обработкой), применяемой на исследуемом месторождении. Биопассивная детоксикация не требует затрат на обезвреживание реагентов, для ее реализации можно применять оборудование (пруды-накопители, насосы, трубопроводы), уже существующее на территории комплекса КВ. Введение дополнительных мероприятий по модернизации отделения орошения, а также по

**Таблица 5**

**Содержание основных токсичных соединений рудного штабеля КВ  
до и после биопассивной детоксикации**

**Table 5**

**Content of major toxic compounds of the HL ore stockpile  
before and after biopassive detoxification**

Компонент / Component	Содержание, мг/л / Content, mg/l	
	До биодетоксикации / Before biotetoxification	После биодетоксикации / After biotetoxification
pH	10,0	9,0–10,0
CN <sup>-</sup>	81,62	0,05
SCN <sup>-</sup>	21,4	0,17
Cu	21,32	<0,05
Ni	0,5	<0,03

уборке и вывозу снега будет проводится при минимальных капитальных и эксплуатационных затратах. Оценка экономической эффективности предлагаемой технологии производилась по изменению суммарных эксплуатационных и капитальных затрат на обезвреживание площадки КВ двух схем [8], которые включали в себя затраты на мероприятия по

уборке и вывозу снега, реагенты и оборудование, электроэнергию, фонд оплаты труда и отчисления на социальные нужды (табл. 6). Все прочие расходы, относящиеся к обезвреживанию отходов КВ при внедрении новой технологии, практически не изменялись, поэтому при проведении расчетов экономической эффективности не рассматривались.

**Таблица 6**

**Эксплуатационные и капитальные затраты на обезвреживание  
рудных штабелей КВ изучаемого месторождения**

**Table 6**

**Capital and operating costs of HL ore stockpile detoxification  
of the deposit under investigation**

Наименование статей / Items	Затраты, тыс. руб. / Costs, thousand of roubles	
	Щелочное хлорирование с последующей купоросной обработкой / Alkaline chlorination followed by vitriolic treatment	Пассивная биодетоксикация / Passive biotetoxification
Реагенты и оборудование / Reagents and equipment	237047,6	1435,6
Мероприятия по уборке и вывозу снега / Measures for snow removal and transportation	0	24475,2
Электроэнергия / Power consumption	5251,0	63011,4
Заработная плата / Salary	681,3	2044,0
Отчисления на социальные нужды / Fringe benefit expences	292,0	876,0
Итого / Total	243271,9	91842,2

Удельный экономический эффект применения технологии биопассивной детоксикации на 1 т руды составил 189,3 руб., что в пересчете на всю площадку КВ (800000 т) изучаемого месторождения – 151429,7 тыс. руб.

#### **Заключение**

Таким образом, на основании проведенных исследований была разработана технология биопассивной детоксикации площадки КВ золота, которая позволяет исключить применение химических реагентов. Предлагаемая технология позволяет использовать метод испарения излишек отработанных технологических растворов без сброса их в окружающую среду. В целях модернизации отделения орошения рекомендуется введение мероприятий по уборке и вывозу снега за пределы промышленной площадки КВ, а также использование оросительной системы с вращающимися эмитерами типа Wobbler.

При проведении исследований на примере месторождения Республики Саха (Якутия) определена продолжительность биодетоксикации рудного штабеля КВ и выявлены основные технологические параметры разработанной технологии, которая позволяет снизить концентрации цианидов с 81,62 до 0,05 мг/л, тиоцианатов – с 21,4 до 0,17 мг/л, меди и никеля – с 21,32 и 0,5 мг/л до менее 0,05 и менее 0,03 мг/л соответственно. Разработаны технологическая и аппаратная схемы процесса биопассивной детоксикации рудного штабеля с использованием существующей инфраструктуры предприятия КВ, что позволяет минимизировать эксплуатационные и капитальные затраты на проведение природоохранных мероприятий. Ожидаемый экономический эффект применения технологии биопассивной детоксикации площадки КВ золота составляет 151429,7 тыс. руб.

#### **Библиографический список**

1. Дементьев Е.В., Дружинина Г.Я., Гудков С.С. Кучное выщелачивание золота и серебра. Иркутск: Изд-во ОАО «Иргиредмет», 2004. 352 с.
2. Минеев Г.Г., Леонов С.Б. Кучное выщелачивание золотосодержащих руд. Иркутск: Изд-во ИРГТУ, 1997. 214 с.
3. Караганов В.В., Ужкенов Б.С. Кучное выщелачивание золота – зарубежный опыт и перспективы развития. Москва – Алматы: Изд-во ТОО «Геоинцентр», 2002. 288 с.
4. Петров С.В. Исследование и разработка технологии обезвреживания отходов кучного выщелачивания золота под действием природных факторов: дис. ... канд. тех. наук: 25.00.36. Иркутск, 2003. 172 с.
5. Белых М.П., Петров С.В., Чикин А.Ю., Адельшин Р.В., Белькова Н.Л. Детоксикация цианидов микробными

- консорциумами из природно-техногенных комплексов кучного выщелачивания золота // Прикладная биохимия и микробиология. 2017. Т. 53. № 3. С. 291–298.
6. Петров С.В., Петров В.Ф. Изучение удаления водорастворимых форм меди из отходов кучного выщелачивания золота // Геохимия. 2007. № 3. С. 337–341.
7. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1964. 608 с.
8. Кудрявский, Ю.П., Черный С.А., Рахимова О.В., Зеленин В.И., Онорин С.А. Анализ экономической эффективности технологии обезвреживания и дезактивации сточных вод редкометаллического производства // Фундаментальные исследования. 2005. № 10. С. 19–22.

## References

1. Dement'ev E.V., Druzhinina G.Ya., Gudkov S.S. *Kuchnoe vyshchelachivanie zolota i serebra* [Heap Leaching of Gold and Silver]. Irkutsk: OAO Irgiredmet Publ., 2004, 352 p.
2. Mineev G.G., Leonov S.B. *Kuchnoe vyshchelachivanie zolotosoderzhashchikh rud* [Heap Leaching of Gold-bearing Ores]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 1997, 214 p.
3. Karaganov V.V., Uzhkenov B.S. *Kuchnoe vyshchelachivanie zolota – zarubezhnyy opyt i perspektivy razvitiya* [Heap leaching of gold: foreign experience and development prospects]. Moscow – Almaty: TOO Geointcentr Publ., 2002, 288 p.
4. Petrov S.V. *Issledovanie i razrabotka tekhnologii obezvrezhivaniya ot khodov kuchnogo vyshchelachivaniya zolota pod deystviem prirodnykh faktorov* [Research and development of gold heap leaching waste detoxification technology under the influence of natural factors]. Irkutsk, 2003, 172 p.
5. Belykh M.P., Petrov S.V., Chikin A.Yu., Adelshin R.V., Belkova N.L. Cyanide detoxification by microbial consortia from natural-industrial complexes of gold heap leaching. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya* [Applied Biochemistry and Microbiology], 2017, vol. 53, no. 3, pp. 331–337. (In Russian).
6. Petrov S.V., Petrov V.F. Study of water-soluble copper compound removal from heap-leach gold wastes. *Geokhimiya* [Geochemistry International], 2007, no. 3, pp. 337–341. (In Russian).
7. Bronshteyn I.N., Semendyaev K.A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov* [Handbook on mathematics for engineers and technical college students]. Moscow: Nauka Publ., 1964, 608 p.
8. Kudryavskiy, Yu.P., Chernyy S.A., Rakhimova O.V., Zelenin V.I., Onorin S.A. Analysis of economic efficiency of neutralization and deactivation technology of rare-metal production sewage. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], 2005, no. 10, pp. 19–22. (In Russian).

### Критерии авторства

Белых М.П., Чикин А.Ю., Петров С.В., Белькова Н.Л. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

### Authorship criteria

Belykh M.P., Chikin A.Yu., Petrov S.V., Belkova N.L. have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

*Статья поступила 20.09.2017 г.*

*The article was received 20 September 2017*