

## ТЕХНОЛОГИЯ БИОПАССИВНОЙ ДЕТОКСИКАЦИИ ЦИАНИДСОДЕРЖАЩИХ СОЕДИНЕНИЙ В ОТХОДАХ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА

## PASSIVE DETOXIFICATION TECHNOLOGY OF CYANIDE-BEARING COMPOUNDS IN GOLD HEAP LEACH STOCKPILED WASTES



*М. П. Бельх,  
Иркутский научно-  
исследовательский  
институт благородных  
и редких металлов и  
алмазов, г. Иркутск  
belykhmarina606@gmail.com*

*M. Belykh,  
Irkutsk Research Institute  
of Noble and Rare Metals  
and Diamonds, Irkutsk*



*А. Ю. Чикин,  
Иркутский  
государственный  
университет,  
г. Иркутск  
anchik53@mail.ru*

*A. Chikin,  
Irkutsk State  
University, Irkutsk*



*С. В. Петров,  
Иркутский научно-  
исследовательский  
институт благородных  
и редких металлов и  
алмазов, г. Иркутск  
svpetrov@mail.ru.*

*S. Petrov,  
Irkutsk Research Institute  
of Noble and Rare Metals  
and Diamonds, Irkutsk*



*Н. Л. Белькова,  
Лимнологический  
институт СО РАН,  
г. Иркутск  
belkova@lin.irk.ru*

*N. Belkova,  
Limnological Institute  
of SB RAS, Irkutsk*

Показано, что в процессе кучного выщелачивания золота образуются цианидсодержащие отходы – технологический раствор и отработанный рудный штабель. Отмечено, что продолжительность их обезвреживания не является лимитирующей, вследствие чего для решения экологических задач большой интерес представляет метод биопассивной детоксикации. Установлено, что данный метод базируется на самопроизвольном разложении цианидов под действием природных факторов, включая деятельность автохтонного бактериального сообщества, и исключает использование токсичных химических реагентов. Для моделирования процесса пассивной детоксикации цианидсодержащих отходов кучного выщелачивания золота проведены длительные эксперименты по хранению рудной массы в условиях зонирования рудного штабеля. Определено, что в процессе пассивной детоксикации биохимические процессы доминируют над простым химическим окислением. Рассчитаны аппроксимирующие уравнения биодеградации основных токсичных соединений (тиоцианатов и цианидов, включая цианидные комплексы меди и никеля), которые позволили прогнозировать продолжительность биопассивной детоксикации промышленной площадки кучного выщелачивания месторождения Республики Саха (Якутия). Разработанная технология позволила оптимизировать водный баланс и использовать метод испарения излишков вод из отработанных технологических растворов без сброса их в окружающую среду, а также 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) в рудном штабеле кучного выщелачивания. Доказано, что разработанные технологическая и аппаратурная схемы процесса предполагают отсутствие реагентов и использование существующей инфраструктуры предприятия, что обеспечивает снижение капитальных и эксплуатационных затрат по сравнению с классической химической технологией обезвреживания. Отмечено, что ожидаемый экономический эффект разработанной технологии составил 151429,7 р.

**Ключевые слова:** цианиды; тиоцианаты; цианидные комплексы меди и никеля; кучное выщелачивание золота; цианидсодержащие отходы; рудный штабель; технологический раствор; биопассивная детоксикация; автохтонные бактериальные сообщества; биодegradация

During gold heap leaching, cyanide-bearing wastes (process solution and stockpiled heap leach wastes) are formed. Their detoxification period is unlimited. In this connection, in order to solve environmental issues, biopassive detoxication method is of great interest. It is based on a spontaneous decomposition of cyanides under the influence of natural factors including the activity of autochthonous bacterial community and, thus, the use of toxic chemical reagents is excluded. In order to model the cyanide-bearing gold heap leach wastes passive detoxification process, long-term experiments on the ore mass storage under the conditions of the ore heap zoning were carried out. It was found that biochemical processes prevail over simple chemical oxidation in the course of passive detoxification. Approximating equations for the major toxic compounds biodegradation (thiocyanates and cyanides including copper and nickel cyanide complexes) were calculated. They predicted the length of biopassive detoxification at an industrial site of a deposit from the Republic of Sakha (Yakutia). The developed technology allows the optimization of water balance and use of evaporation method for the excess of water from spent process solutions without their discharge to the environment as well as the decrease in the concentration of cyanides (from 81,62 mg/L, down to 0,05 mg/L), thiocyanates (from 21,4 mg/L, down to 0,17 mg/L), copper and nickel (from 21,32 mg/L and 0,5 mg/L, to less than 0,05 mg/L and 0,03 mg/L, respectively) in the ore heap. The developed flow sheet and equipment scheme of the process propose the elimination of reagents and use of the infrastructure available at the site. This allows the reduction of capital and operational costs compared to conventional chemical detoxification technology. The expected economic result from using the developed technology was 151429,7 roubles

**Key words:** cyanides; thiocyanates; copper and nickel cyanide complexes; gold heap leaching; cyanide-bearing wastes; ore heap; process solution; biopassive detoxication; autochthonous bacterial communities; biodegradation

**Введение.** В технологическом процессе кучного выщелачивания (КВ) золота, реализуемом на открытых площадках промышленных объектов, образуются опасные цианидсодержащие отходы – отработанный рудный штабель и технологический раствор, которые негативно влияют на окружающую среду и создают большую опасность как для экосистемы в целом, так и для здоровья человека, в частности. Отработанный технологический раствор обезвреживается и сбрасывается в окружающую среду с учетом нормативов допустимых сбросов (НДС), а рудный штабель промывается оборотными растворами или водой и подвергается рекультивации [1].

Для детоксикации отходов КВ золота в России, преимущественно, используются химические методы, которые хотя и являются эффективными, но не исключают повторного загрязнения окружающей среды используемыми реактивами [2]. За рубежом большое развитие получили методы биообезвреживания отходов горнодобывающей промышленности [5; 7; 8; 11], основанные на изоляции биотехнологиче-

ски активных бактериальных штаммов-деструкторов и использовании их в детоксикации отходов. Применение подобных мероприятий для обезвреживания отходов КВ, расположенных на территории РФ, сталкивается с проблемами поддержания активности изолированных штаммов при резких сезонных колебаниях температур и преодоления ограниченности бактериальных штаммов в деструкции высоких концентраций цианидов.

Для решения экологических задач детоксикации отходов КВ золота, продолжительность обезвреживания которых не является лимитирующей, особый интерес представляют процессы биопассивной детоксикации. Данные процессы основаны на деятельности не отдельных представителей (изолированных штаммов), а целого автохтонного бактериального сообщества [4; 6; 9]. Внедрение такой безреагентной технологии для обезвреживания отработанных установок КВ позволит достичь значимого экономического эффекта и снизить экологическую нагрузку на районы размещения промышленных объектов.

Изучению вопросов пассивной детоксикации, а также биообезвреживания цианидсодержащих отходов посвящен ряд работ зарубежных ученых [3; 4; 6; 10; 12 и др.]. Разработаны полупассивные технологии: Biopass, Homestake и ASTER, которые, преимущественно, направлены на детоксикацию высоких концентраций тиоцианатов и мало применимы к деструкции высоких концентраций цианидов. В России подобные работы немногочисленны. Исходя из сказанного, целью исследования является разработка технологии биопассивной детоксикации цианидсодержащих соединений в отходах КВ золота месторождений, расположенных на территории РФ.

**Методология и методика исследования.** Отбор проб проводили в 2014 г. на одном из месторождений Республики Саха (Якутия). В качестве объектов исследования выступали технологический раствор и руда действующего штабеля КВ.

Для выравнивания химического состава влаги рудной массы руду промывали технологическим раствором и делили на две равные части. Одну часть использовали в эксперименте как нестерильный образец,

содержащий автохтонное бактериальное сообщество. Вторую часть стерилизовали дробным автоклавированием (121 °С, 1 ч – 3 раза, с промежутком между стерилизацией 24 ч), заливали технологическим раствором, простерилизованным через стерильные нитроцеллюлозные фильтры с диаметром пор 0,22 мкм (Millipore, США), а затем использовали в качестве контроля. Предполагалось, что в нем после стерилизации отсутствуют бактерии и протекают только химические процессы.

Анализ влаги рудных масс стерильных и нестерильных образцов проводили с использованием стандартных химических методов (ПНД Ф 14.1:2:3.95–97, ПНД Ф 14.1:2:3.98–97, ПНД Ф 14.1:2:3.96–97, ПНД Ф 14.1:2:159–2000, ПНД Ф 14.1:2:4.114–97, ПНД Ф 14.1:2.56–96, ПНД Ф 14.1:2:4.156–99 и ПНД Ф 14.1:2:4.135–98). В результате определено, что влага рудных масс обоих образцов содержала высокие концентрации цианидов, тиоцианатов и тяжелых металлов (алюминий, мышьяк, кобальт, медь, железо и никель) (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

**Химический состав влаги рудной массы нестерильного и стерильного образцов /  
Chemical composition of the liquid phase of non-sterile and sterilized samples**

Определяемые компоненты / Determined components	Нестерильный образец / Nonsterile sample	Стерильный образец / Sterilized sample	ПДК* / МАС*
рН	10,9	8,9	
Концентрация, мг/л / Concentrations, 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.* МАС\* – maximum admissible concentrations

Ранее С.В. Петровым в рудном штабеле КВ условно выделено четыре слоя, кото-

рые различаются по температурному режиму, наличию или отсутствию аэрации. На

основании этого для разработки технологии биопассивной детоксикации стерильные и нестерильные образцы хранили в четырех модельных экспериментах – слой 2 (летний период: +20 °С, +O<sub>2</sub>, зимний период: –18 °С, +O<sub>2</sub>), слой 3 (+4 °С, +O<sub>2</sub>) и слой 4 (+4 °С, –O<sub>2</sub>), которые соответствовали условиям, создаваемым в рудном штабеле во время его складирования на промышленной площадке КВ. Слой 1 исключен из анализа из-за незначительной мощности и не существенного влияния на деструкцию токсичных соединений.

Во время хранения образцов в условиях модельных экспериментов (593 сут) отбор проб для анализа проводили один раз в два месяца. Концентрацию токсичных веществ во влаге рудной массы исследовали с помощью метода водных и щелочных вытяжек. При этом содержание цианидов (CN<sup>-</sup>) и тиоцианатов (SCN<sup>-</sup>) определяли в щелочной вытяжке для исключения потерь цианида в газовую фазу в виде синильной кислоты. Концентрацию нелетучих токсичных веществ исследовали в водной вы-

тяжке. Химический анализ проводили по стандартным методикам, представленным ранее.

Для определения метода ликвидации излишков вод технологических растворов определяли водный баланс установки КВ золота исследуемого месторождения. Полученные в ходе модельных экспериментов аппроксимирующие уравнения биодеградации основных токсичных соединений использовали для расчета продолжительности операции обезвреживания рудного штабеля КВ.

*Результаты и их обсуждение.* Наиболее интенсивная деструкция цианидов (на 98,9 и 99,3 %) отмечена при положительных температурах и наличии аэрации – модельные условия: 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) составила 1,26 и 0,58 мг/л/сут и была в 4 и 6 раз выше по сравнению со стерильными образцами (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

**Деструкция токсичных соединений при культивировании в модельных условиях зонирования рудного штабеля КВ / The destruction of toxic compounds during cultivation under the model conditions of zoning of the ore HL**

Образец / Samples	Слой 2 (летний период) (+20 °С, +O <sub>2</sub> ) / Layer 2 (summer season) (+20 °С, +O <sub>2</sub> )		Слой 2 (зимний период) (-18 °С, +O <sub>2</sub> ) / Layer 2 (winter season) (-18 °С, +O <sub>2</sub> )		Слой 3 (+4, +O <sub>2</sub> ) / Layer 3 (+4, +O <sub>2</sub> )		Слой 4 (+4 °С, -O <sub>2</sub> ) / Layer 4 (+4 °С, -O <sub>2</sub> )	
	1*	2**	1	2	1	2	1	2
Цианиды, мг/л / WAD-cyanide, mg/L								
Нестерильный / Nonsterile	98,9	1,26	33,7	0,05	99,3	0,58	96,2	0,13
Стерильный / Sterilized	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 / Sterilized	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 / Sterilized	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 / Sterilized	100	0,001	НУ / NR		НУ / NR		НУ / NR	

*Примечание:* \* – процент удаления токсичных соединений за время проведения экспериментов (593 сут); \*\* – удаление токсичных соединений за сутки, мг/л; НУ\*\*\* – нет удаления токсичного соединения / *Note:* \* – percent of the toxic compound removal within the test period (593 days); \*\* – toxic compound removal per day, mg/L; NR\*\*\* – no removal of the toxic compound

Уменьшение концентрации тиоцианатов отмечали только при отрицательных температурах слоя 2 (зимний период). При этом в нестерильной рудной массе интенсивность деструкции была выше (67,7 %), чем в стерильной (9,2 %) (табл. 2). Так же, как и для цианидов, снижение концентраций меди и никеля в нестерильной рудной массе было на порядок выше, чем в контроле (табл. 2). Кроме того, отмеченная корреляция деструкции цианидов со снижением концентрации меди и никеля свидетельствовала о том, что в исследуемой рудной массе данные металлы преимущественно находятся в виде растворимых цианидных комплексов.

Таким образом, полученные результаты в ходе проведения модельных экспери-

ментов свидетельствуют о доминировании биохимических процессов в пассивной детоксикации рудного штабеля КВ золота по сравнению с простым химическим окислением.

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 КВ. Аппроксимирующие уравнения биодegradации были использованы при разработке технологии биопассивной детоксикации цианидсодержащих отходов КВ золота одного из месторождений Республики Саха (Якутия).

Таблица 3 / Table 3

**Аппроксимирующие уравнения биодegradации основных токсичных соединений / Biodegradation approximation equations of major toxic compounds**

Токсичные соединения / Toxic compounds	Период дегradации / Degradation period	Аппроксимирующее уравнение / Approximation equation	Достоверность аппроксимации / Approximation validity
Цианиды (включая цианидные комплексы Cu и Ni) / Cyanides (including cyanide complexes of Cu and Ni)	Летний период / Summer season	$\frac{\ln 81,63 - \ln C}{0,012} = t$	0,9507
Цианиды (включая цианидные комплексы Cu и Ni) / Cyanides (including cyanide complexes of Cu and Ni)	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;  $t$  – скорость деструкции цианидов и тиоцианатов, сут / *Note.*  $C$  – concentrations of cyanides and thiocyanates at given point, mg/L; /  $t$  – cyanides and thiocyanates destruction rates, day

Для определения способа утилизации излишков вод отработанных технологических растворов проводили расчет водного баланса установки КВ. К основным объектам, которые задействованы в формировании водного баланса, относят систему «рудный штабель – пруды-накопители». По данным технологического регламента, рудный штабель установки КВ изучаемого месторождения, подлежащий сезонно-

му обезвреживанию, содержал 200 000 т руды. Насыпная плотность руды составляла 1,63 т/м<sup>3</sup>, угол естественного откоса штабеля КВ – 36°, высота – 8 м. Штабель имел форму усеченной пирамиды, соотношение сторон которого равно 1,5:1. Нами определены основные размеры рудного штабеля и вычислена площадь установки КВ, соприкасающаяся с атмосферой, которая составила 19 362,26 м<sup>2</sup>. Помимо рудного шта-

бея 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 осадков и испарения с открытой водной поверхности в районе расположения объекта. Для ликвидации излишков вод рекомендуется проводить мероприятия по уборке и вывозу снега за пределы промышленной площадки, а для интенсификации испарения воды в летний период – модернизацию отделения орошения с использованием оросительной системы с вращающимися эмиттерами типа Wobblers (Senninger Irrigation Inc., США). Разность между испарением с открытой поверхности воды и поверхности установки КВ с предполагаемым орошением характеризуется эмпирическим коэффициентом, равным 1,2.

На основании полученных данных рассчитан водный баланс основных объектов площадки КВ. 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 обратными 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 рассчитаны для одного рудного штабеля КВ (200 000 т), результаты исследования можно перенести на весь комплекс установок КВ (800 000 т).

Полученные 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, что позволит снизить концентрации 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.

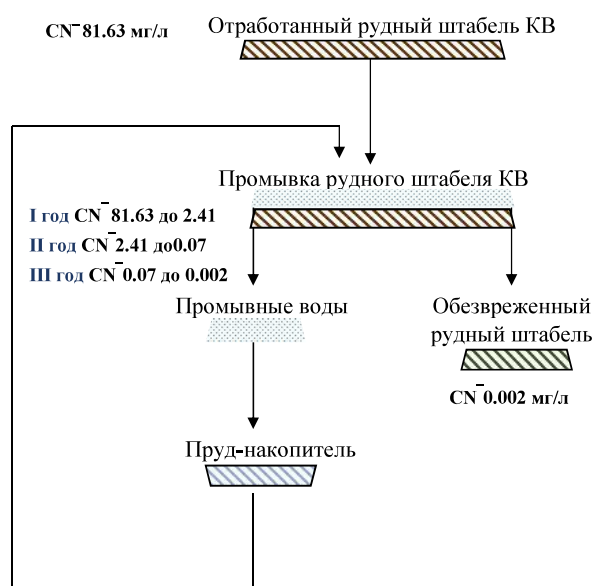
Таблица 4 / Table 4

**Результаты расчетов продолжительности обезвреживания цианидов, включая цианидные комплексы меди и никеля / The results of calculations on cyanides detoxification period including copper and nickel cyanide complexes**

Продолжительность / Period	Исходная концентрация, мг/л / Initial concentration, mg/L	Летний период / Summer period	Зимний период / Winter period
		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

На основании полученных результатов исследования для промышленной площадки КВ (с 4 рудными штабелями по 200 000 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 сут; продолжительность операции испарения технологических растворов и дренажных вод за первый теплый сезон обезвреживания – 150 сут. Дополнительно разработаны технологическая и аппаратурная схемы. Технологическая схема представлена на рисунке.



Технологическая схема процесса биопассивной детоксикации рудного штабеля КВ с модернизированным отделением орошения  
 Process flow diagram of gold heap leach pile passive detoxification with a modernized irrigation circuit

Процесс биопассивной детоксикации предлагается начинать в теплый период на следующий год после прекращения операции выщелачивания золота. Технологические растворы и дренажи будут испаряться в системе, состоящей из рудного штабеля и прудов-накопителей. Подачу промывных вод на рудный штабель предлагается осуществлять насосом, а орошение – с помощью оросительной системы с эмиттерами типа Wobbler. Сбор дренажей проводится дренажной системой, по которой воды будут поступать в пруд-накопитель. 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 отходов удовлетворяет нормам НДС для практически любых районов расположения предприятий с технологией КВ (табл. 5).

Таблица 5 / Table 5

Содержание основных токсичных соединений рудного штабеля КВ до и после биопассивной детоксикации / The content of major toxic compounds of the ore heap before and after passive 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

После трех лет детоксикации оставшиеся соединения в рудном штабеле КВ не будут оказывать существенного влияния на окружающую среду, а технологические и дренажные воды будут полностью испарены.

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. Оценка экономической эффективности предлагаемой технологии производилась по изменению суммарных эксплуатационных и капитальных затрат на обезвреживание площадки КВ двух схем, которые включали затраты на мероприятия по уборке и вывозу снега, реагенты и оборудование, электроэнергию, фонд оплаты труда и отчисления на социальные

нужды. Прочие расходы, относящиеся к обезвреживанию отходов КВ при внедрении новой технологии, практически не изменялись, поэтому при проведении расчетов экономической эффективности они не рассматривались. В результате расчетов ожидаемый экономический эффект применения технологии биопассивной детоксикации всей площадки КВ золота (800 000 т) составил 151429,7 р.

**Выводы.** В результате проведенного исследования разработана технология биопассивной детоксикации площадки КВ золота, позволяющая исключить применение химических реактивов. Предлагаемая технология предоставляет возможность использовать метод испарения излишек отработанных технологических растворов без сброса их в окружающую среду. Рекомендуется, во-первых, введение мероприятий по уборке и вывозу снега за пределы промышленной площадки КВ, во-вторых,

в целях модернизации отделения орошения – использование оросительной системы с вращающимися эмиттерами 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) за три года. Разработанные технологическая и аппаратная схемы процесса биопассивной детоксикации рудного штабеля с использованием существующей инфраструктуры предприятия КВ позволяют минимизировать эксплуатационные и капитальные затраты на проведение природоохранных мероприятий.

#### Список литературы

1. Емельянов Ю.Е., Шкетова Л.Е., Гудков С.С., Копылова Н.В., Верховина В.А. Кучное бактериальное выщелачивание золотосодержащих руд // Горный журнал. 2012. № 8. С. 108–111.
2. Петров В.Ф., Петров С.В. Сравнение технологий и стоимости обезвреживания отходов гидрометаллургических процессов извлечения золота [Электронный ресурс] // Золотодобыча. 2012. № 164. Режим доступа: <https://www.zolotodb.ru/articles/technical/10699> (дата обращения: 23.10.2017).
3. Declercq J., Tait D., Bowell R. Modeling cyanide degradation in heap leach systems: from laboratory to reality // Proceedings IMWA 2016. Freiberg, Germany, 2016. P. 417–424.
4. Huddy R.J., Zyl A.W., Hille R.P., Harrison S.T.L. Characterisation of the complex microbial community associated with the ASTER™ thiocyanate biodegradation system // Minerals Engineering. 2015. Vol. 76. P. 65–71.
5. Kandasamy S., Dananjeyan B., Krishnamurthy K., Benckiser G. Aerobic cyanide degradation by bacterial isolates from cassava factory wastewater // Brazilian Journal of Microbiology. 2015. Vol. 46. № 3. P. 659–666.
6. Kantor R.S., Zyl A.W., Hille R.P., Thomas B.C., Harrison S.T.L., Banfield J. Bioreactor microbial ecosystems for thiocyanate and cyanide degradation unravelled with genome-resolved metagenomics // Environmental Microbiology. 2015. Vol. 17. № 12. P. 4929–4941.
7. Karamba K.I., Syed M.A., Shukor M.Y., Ahmad S.A., Karamba K.I. Effect of heavy metals on cyanide biodegradation by resting cells of *Serratia marcescens* strain AQ07 // Journal of Environmental Microbiology and Toxicology. 2014. Vol. 2. № 2. P. 58–60.
8. Kumar V., Kumar V., Bhalla T.C. Statistical enhancement of cyanide degradation using microbial consortium // Microbial and Biochemical Technology. 2015. Vol. 7. № 6. P. 344–350.
9. Mirzadeh S., Yaghmaei S., Ghobadi N.Z. Biodegradation of cyanide by a new isolated strain under alkaline conditions and optimization by response surface methodology (RSM) // Journal of Environmental Health Science and Engineering. 2014. Vol. 12. № 85. P. 1–9.
10. Ndur S.A., Doe J.M., Asiam E.K. Natural cyanide attenuation in a tailings dam in South-Western Ghana // Research Journal of Environmental and Earth Sciences. 2015. Vol. 7. № 2. P. 24–28.
11. Parmar P., Soni A., Vyas K., Desai P.V. Isolation and characterization of cyanide degrading bacterial strains from contaminated soil // International Journal of Environmental Sciences. 2012. Vol. 2. № 4. P. 2006–2014.
12. Singh N., Agarwal B., Majumder C.B. Comparative studies on simultaneous biodegradation of phenol and cyanide using different strains // Journal of Engineering Research and Applications. 2014. Vol. 4. № 3. P. 827–831.



## References

---

1. Emeliyanov Yu.E., Shketova L.E., Gudkov S.S., Kopylova N.V., Verhozina V.A. *Gorny zhurnal* (Mining Journal), 2012, no. 8, pp. 108–111.
2. Petrov V.F., Petrov S.V. *Zolotodobycha* (Gold mining), 2012, no. 164. Available at: <http://www.zolotodb.ru/articles/technical/10699> (Date of access: 23.10.2017).
3. Declercq J., Tait D., Bowell R. *Proceedings IMWA 2016* (Proceedings IMWA 2016). Freiberg, Germany, 2016, pp. 417–424.
4. Huddy R.J., Zyl A.W., Hille R.P., Harrison S.T.L. *Minerals Engineering* (Minerals Engineering), 2015, vol. 76, pp. 65–71.
5. Kandasamy S., Dananjeyan B., Krishnamurthy K., Benckiser G. *Brazilian Journal of Microbiology* (Brazilian Journal of Microbiology), 2015, vol. 46, no. 3, pp. 659–666.
6. Kantor R.S., Zyl A.W., Hille R.P., Thomas B.C., Harrison S.T.L., Banfield J. *Environmental Microbiology* (Environmental Microbiology), 2015, vol. 17, no. 12, pp. 4929–4941.
7. Karamba K.I., Syed M.A., Shukor M.Y., Ahmad S.A., Karamba K.I. *Journal of Environmental Microbiology and Toxicology* (Journal of Environmental Microbiology and Toxicology), 2014, vol. 2, no. 2, pp. 58–60.
8. Kumar V., Kumar V., Bhalla T.C. *Microbial and Biochemical Technology* (Microbial and Biochemical Technology), 2015, vol. 7, no. 6, pp. 344–350.
9. Mirizadeh S., Yaghmaei S., Ghobadi N.Z. *Journal of Environmental Health Science and Engineering* (Journal of Environmental Health Science and Engineering), 2014, vol. 12, no. 85, pp. 1–9.
10. Ndur S.A., Doe J.M., Asiam E.K. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences* (Research Journal of Environmental and Earth Sciences), 2015, vol. 7, no. 2, pp. 24–28.
11. Parmar P., Soni A., Vyas K., Desai P.V. *International Journal of Environmental Sciences* (International Journal of Environmental Sciences), 2012, vol. 2, no. 4, pp. 2006–2014.
12. Singh N., Agarwal B., Majumder C.B. *Journal of Engineering Research and Applications* (Journal of Engineering Research and Applications), 2014, vol. 4, no. 3, pp. 827–831.

## Коротко об авторах

---

**Белых Марина Петровна**, мл. науч. сотрудник отдела охраны окружающей среды, Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов, г. Иркутск, Россия. Область научных интересов: детоксикация цианидсодержащих отходов, биodeградация и удаление токсичных соединений из отходов горнодобывающей промышленности, разнообразие микробных сообществ отходов, содержащих цианиды и тиоцианаты, молекулярно-генетические методы исследования  
[belykhmarina606@gmail.com](mailto:belykhmarina606@gmail.com)

**Чикин Андрей Юрьевич**, д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии предпринимательства и методики их преподавания», Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия. Область научных интересов: теоретическое обоснование и разработка технологий физико-химической и биотехнологической очистки производственных и сточных вод с использованием природных, техногенных сорбентов и микробных сообществ  
[anchik53@mail.ru](mailto:anchik53@mail.ru)

**Петров Сергей Владимирович**, канд. техн. наук, зав. лабораторией охраны окружающей среды, Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов, г. Иркутск, Россия. Область научных интересов: очистка промышленных отходов и сточных вод  
[svpetrov@mail.ru](mailto:svpetrov@mail.ru)

**Белькова Наталья Леонидовна**, канд. биол. наук, доцент, ст. науч. сотрудник лаборатории аналитической биоорганической химии, Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия. Область научных интересов: молекулярная экология микробных сообществ различных, в т.ч. и экстремальных, мест обитания  
[belkova@lin.irk.ru](mailto:belkova@lin.irk.ru)

## Briefly about the authors

---

**Marina Belykh**, junior research scientist, Environmental Lab, Irkutsk Research Institute of Noble and Rare Metals and Diamonds, Irkutsk, Russia. Sphere of scientific interests: detoxification of cyanide-bearing wastes, biodegradation and remove toxic compounds from wastes of the gold-mining industry, microbial biotechnology, diversity microbial community of wastes, which contain cyanides and thiocyanates, molecular genetic methods

**Andrey Chikin**, doctor of technical sciences, professor, Technology, Business Activity and Teaching Methodology department, Irkutsk State University, Irkutsk, Russia. Sphere of scientific interests: theoretical background and development of technologies of physical-chemical and biotechnological purification of process waters and effluents using natural, man-made adsorbents and microbial communities

**Sergey Petrov**, candidate of technical sciences, head of the Environmental Lab, Irkutsk Research Institute of Noble and Rare Metals and Diamonds, Irkutsk, Russia. Sphere of scientific interests: purification of industrial wastes and effluents

**Natalia Belkova**, candidate of biological sciences, associate professor, senior scientific researcher, Analytical Bioorganic Chemistry department, Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, Russia. Sphere of scientific interests: molecular ecology of microbial communities in various, including extreme habitats

**Образец цитирования** \_\_\_\_\_

*Бельх М. П., Чикин А. Ю., Петров С. В., Белькова Н. Л. Технология биопассивной детоксикации цианидсодержащих соединений в отходах ручного выщелачивания золота // Вестн. Забайкал. гос. ун-та. 2017. Т. 23. № 10. С. 4–13. DOI: 10.21209/2227-9245-2017-23-10-4-13.*

*Belykh M., Chikin A., Petrov S., Belkova N. Passive detoxification technology of cyanide-bearing compounds in gold heap leach stockpiled wastes // Transbaikal State University Journal, 2017, vol. 23, no. 10, pp. 4–13. DOI: 10.21209/2227-9245-2017-23-10-4-13.*

Дата поступления статьи: 23.10.2017 г.  
Дата опубликования статьи: 31.10.2017 г.

