Д. т. н. **А. В. Хохряков**, к. т. н. **Г. А. Студенок** (✉), к. т. н. **А. Г. Студенок**, к. т. н. **А. М. Ольховский**

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, Россия

УДК 628.3

ВЫБОР МЕТОДА ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИ ДОБЫЧЕ АСБЕСТСОДЕРЖАЩЕЙ РУДЫ

Выполнен анализ механизма загрязнения карьерных вод при буровзрывной подготовке асбестсодержащего сырья под влиянием техногенных и природных факторов, который может служить основой для принятия конкретных технологических решений, обеспечивающих снижение негативного воздействия на окружающую среду при разработке месторождений хризотил-асбеста. Представлена зависимость поступления соединений азота в карьерные воды от расхода взрывчатых веществ и объема образования карьерных вод. Показана возможность использования очистки карьерных вод в отработанных открытых горных выработках, борта которых сложены пластичными асбестсодержащими породами. Проанализирована связь объемов внутреннего отвалообразования с загрязнением карьерных дренажных вод.

Ключевые слова: *асбестсодержащая руда, серпентиниты, очистка карьерных вод.*

Огнеупорные свойства хризотил-асбеста предопределили его использование при изготовлении несгораемых текстильных изделий, фильтров, теплоизоляции, огнестойких красок, наполнителей для пластмасс и асбестоцемента. Производство асбеста связано с добычей асбестсодержащих серпентинитов открытым способом с применением буровзрывной подготовки горной массы и последующим сухим обогащением. Одним из экологических последствий буровзрывной подготовки горной массы на предприятиях по добыче асбестсодержащей руды является загрязнение карьерных дренажных вод, сбрасываемых в дальнейшем в водные объекты, соединениями азота. Кроме буровзрывной подготовки источником загрязнения карьерных вод является технология внутреннего отвалообразования, являющаяся дополнительным источником поступления соединений азота в карьерные воды (вследствие вымывания атмосферными осадками и подземными водами сорбированных взорванной горной массой оксидов азота). Очистка этих вод может производиться в отработанных открытых горных выработках, при этом одним из основных критериев их применимости для целей очистки является отсутствие обратного оттока очищаемых вод из них. Это условие является выполнимым для предприятий, добывающих асбестсодержащие серпентиниты, ввиду высокой пластичности данных пород, а также содержания в них волокон асбеста, которые могут усиливать водоупорные свойства.

✉
Г. А. Студенок
E-mail: genand@mail.ru

Основной объем отводимых в поверхностные водные объекты сточных вод горных предприятий вне зависимости от способа разработки месторождения приходится на дренажные воды, образующиеся при осушении месторождений. Основная часть загрязнения этих вод приходится на соединения азота (продукты распада аммиачной селитры) — основного компонента массово применяемых в настоящее время во всем мире при разработке месторождений полезных ископаемых взрывчатых веществ (эмульсия водного раствора аммиачной селитры в жидких углеводородах с различными добавками). Соединения азота представлены в дренажных водах ионом аммония, ионом нитрита и ионом нитрата.

Величина платы за сброс загрязняющих веществ со сточными водами определяется в настоящее время [1] умножением платежной базы (массы загрязняющего вещества, сброшенного за год, в тоннах) на ставку платы за сброс одной тонны данного вещества. Размеры ставок платы прямо пропорциональны экологической опасности загрязняющих веществ. Так, за 1 т аммонийного азота, отведенного в водные объекты, предприятие обязано было заплатить в 2019 г. с учетом [2] без повышающих коэффициентов 1237,8 руб., за 1 т иона нитрита и 1 т иона ни-

трата 7736,6 и 15,5 руб. соответственно. Наиболее высокая величина ставки платы за сброс нитрит-иона объясняется его большей экологической опасностью по сравнению с другими соединениями азота, в первую очередь для ихтиофауны водных объектов. Нитрит-ион реагирует с гемоглобином крови рыб, что вызывает у них гипоксию. Нитрит-ионы также негативно влияют на организм человека [3].

Снижение концентрации соединений азота в карьерных водах может быть достигнуто двумя группами мероприятий: очисткой карьерных вод от соединений азота различными способами, а также инженерно-техническими и инженерно-организационными мероприятиями по предотвращению загрязнения карьерных вод соединениями азота.

Очистка может производиться физико-химическими, химическими и биологическими методами. На крупных горных предприятиях на практике реализуется биологический метод очистки [4–6] вследствие необходимости обработки значительных объемов карьерных вод, что практически невозможно при применении химических и физико-химических методов очистки ввиду крайне высоких удельных затрат.

Инженерно-технические и инженерно-организационные мероприятия предполагают корректировку технологических процессов горного предприятия, касающихся буровзрывных работ [7–11]. При этом если мероприятия организационного характера (например, минимизация проливов взрывчатых веществ (ВВ) при транспортировке и зарядке скважин и своевременная ликвидация проливов) касаются в основном производственной дисциплины и могут быть реализованы путем ее повышения, то, например, предварительное осушение скважин с вводом гидрофобизирующих агентов или применение ВВ с низким содержанием азота меняет саму технологию взрывных работ, что неизбежно приведет к удорожанию данного процесса и скажется на себестоимости продукции.

Кроме того, рассмотренные мероприятия, направленные на предотвращение загрязнения карьерных вод соединениями азота, касаются только той массы соединений азота, которые переходят в карьерные воды за счет частичного растворения ВВ, и не могут повлиять на те соединения азота (среди которых наиболее токсичный — нитритный азот), наличие которых в карьерных водах объясняется переходом в них продуктов взрыва — оксидов азота.

Поступление в карьерные воды соединений азота при ведении взрывных работ связано с комплексом процессов, накладывающихся друг на друга: растворением аммиачной селитры (нитрата аммония), входящей в состав взрывчатых веществ, при зарядке обводненных скважин; адсорбцией окислов азота, образующихся при взрыве, горной массой и последующим их вымыванием атмосферными осадками.

Поступление в карьерные воды аммонийного азота связано с его растворением и вымыванием из нитрата аммония при зарядке обводненных скважин (просыпями или разливами взрывчатых веществ при зарядке скважин, а также с отказами скважин). Загрязнение карьерных вод нитритным азотом связано только с сорбцией горной массой образующихся при взрывах оксидов азота, их последующим вымыванием атмосферными осадками и поступлением образующегося нитритного азота в карьерные воды. Поступление нитратного азота в карьерные воды связано как с процессом растворения нитрата аммония (как и аммонийного азота), так и с вымыванием атмосферными осадками сорбированных горной массой оксидов азота. В результате количество соединений азота, поступающих в карьерные воды в условиях конкретного горного предприятия определяется как техногенными, так и природными факторами. К техногенным факторам относятся объемы и виды применяемых ВВ при буровзрывной подготовке горной массы к экскавации и их свойства (водорастворимость ВВ в обводненных скважинах, количество газообразных оксидов азота, образующихся при ведении взрывных работ). К природным факторам относятся гидрогеологические (обводненность горных пород), гидрометеорологические (количество атмосферных осадков) и гидрохимические (химический состав дренируемых подземных вод) условия разрабатываемых месторождений. Природные факторы определяют в конечном счете объемы карьерных дренажных вод.

В соответствии с химическим составом аммиачной селитры и молекулярной массой образующихся при ее растворении ионов NH_4NO_3 в ней содержится 22,5 % иона NH_4^+ и 77,5 % иона NO_3^- (соотношение $NO_3^-/NH_4^+ = 3{,}44$). Точно такое же количественное соотношение между ионами NH_4^+ и NO_3^- будет сохраняться и в дренажных водах при протекании процесса растворения ВВ. Остальное количество иона NO_3^- в дренажных водах будет связано с вымыванием сорбированных горной массой оксидов азота. Массу нитрит-иона можно рассчитать вычитанием из общей массы соединений азота массы иона аммония и иона нитрата. Результаты расчета массы выноса поступающих соединений азота в дренажные воды от растворения ВВ в скважинах и вымывания сорбированных оксидов азота из горной массы на примере крупного горного предприятия приведены в таблице. В среднем от количества используемой аммиачной селитры в карьерный водоотлив поступает около 9,8 % (3,4 % от растворения аммиачной селитры и 6,4 % от вымывания сорбированных окислов азота), что в сочетании со значительными объемами исполь-

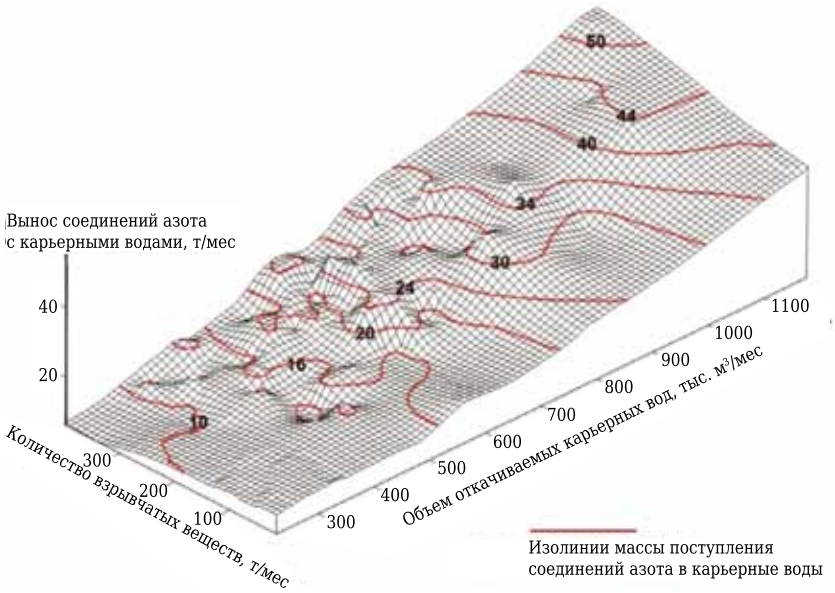

Рис. 1. Графическая трехмерная модель изменения массы соединений азота в карьерных водах в зависимости от объема отводимых карьерных вод и массы азота в использованных ВВ

зования ВВ (в среднем около 10 тыс. т ежегодно в пересчете на массу аммиачной селитры) приводит к существенному загрязнению карьерных дренажных вод.

На основе анализа результатов наблюдений за поступлением соединений азота в карьерные воды, динамикой расхода взрывчатых веществ и объема карьерных вод в период 2006–2017 гг. для условий крупного горного предприятия по производству хризотил-асбеста была построена двухпараметрическая модель (рис. 1), отражающая зависимость поступления соединений азота в карьерные воды от расхода ВВ и объема карьерных вод. Количественное соотношение расхода ВВ и объема карьерных вод, определяющее массу поступающих с карьерными водами соединений азота в окружающую среду, т/мес, рассчитано по формуле:

$$M = 0{,}0447V + 0{,}0199B - 11{,}197,$$

где V — объем карьерных вод, тыс. м³/мес; B — расход ВВ, т/мес.

На рис. 2 и 3 показаны графики, характеризующие влияние отдельных факторов на

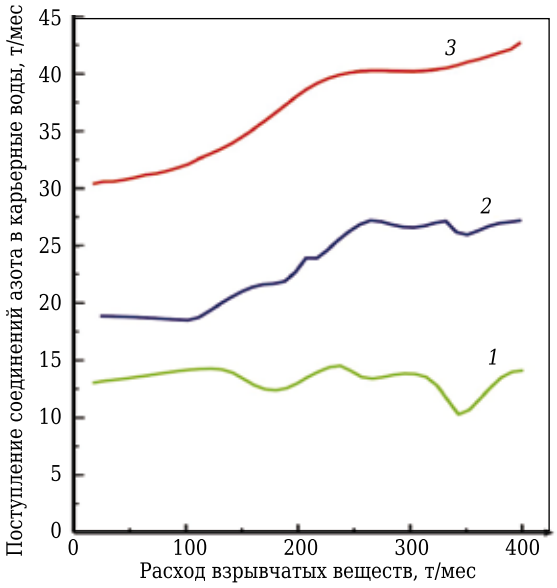

Рис. 2. Зависимость поступления соединений азота в карьерные воды от расхода взрывчатых веществ при постоянном объеме карьерных вод в условиях крупного горного предприятия – производителя хризотил-асбеста: *1* — 400 тыс. м³/мес; *2* — 700 тыс. м³/мес; *3* — 1000 тыс. м³/мес

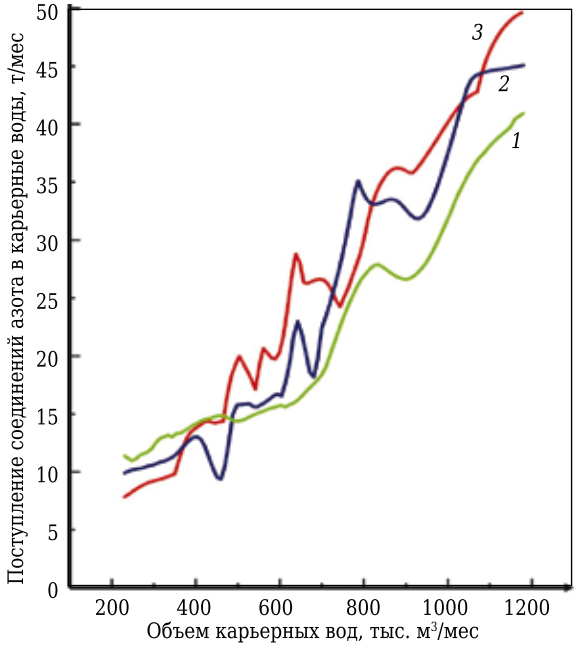

Рис. 3. Зависимость поступления соединений азота в карьерные воды от объема образования карьерных вод при постоянном расходе взрывчатых веществ в условиях крупного горного предприятия – производителя хризотил-асбеста: *1* — 100 т/мес; *2* — 200 т/мес; *3* — 300 т/мес

массу поступления соединений азота в карьерные воды. Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод о ведущем вкладе объема карьерных вод на поступление в них соединений азота. При увеличении объема карьерных вод в 2 раза (от 400 до 800 тыс. м^3/мес) поступление соединений азота в карьерные воды увеличилось в 2,2 раза (от 13,7 до 30 т/мес) при расходе ВВ 300 т/мес (см. рис. 3). В случае такого же двукратного увеличения количества ВВ (от 200 до 400 т/мес) поступление в них соединений азота увеличивается незначительно (от 38 до 42,5 т/мес) при максимальном значении объема образования карьерных вод 1000 тыс. м^3/мес (см. рис. 2).

Преимущественное влияние объема карьерных дренажных вод на поступление соединений азота в карьерные воды объясняется следующим. Лимитирующей (ограничивающей) стадией процесса массоотдачи, который описывается законом Фика, является перенос растворяющегося вещества путем молекулярной диффузии в пограничном слое толщиной δ:

$$M/t = D \cdot F \cdot (C_{нас} - C_o)/\delta,$$

где M — масса вещества, переходящего в раствор (карьерные воды) за время t; D — коэффициент диффузии соединений азота, переходящих в раствор (карьерные воды) за время t; F — площадь поверхности растворения (поверхность контакта жидкой и твердой фаз); $C_{нас}$, C_o — соответственно концентрация насыщенного раствора рассматриваемого вещества и концентрация в объеме раствора.

Главным фактором, влияющим на интенсивность процесса, является площадь поверхности контакта F жидкой (атмосферные, талые и подземные воды) и твердой фаз (горная масса).

Концентрации соединений азота в карьерных водах характеризуются значениями на несколько порядков ниже концентрации насыщенных растворов солей аммония, нитритов и нитратов, которые относятся к хорошо растворимым веществам. В результате значение разности концентраций $C_{нас}–C_o$ для каждого соединения азота может быть принято практически равным его концентрации в насыщенном растворе.

Осушение карьера путем отведения подземных вод и атмосферных осадков через сеть водоспускных скважин в подземные выработки с откачкой сформированных карьерных вод на поверхность формирует в целом проточный режим обтекания твердой фазы (горная масса) жидкой фазой (карьерные воды). В этом случае поверхность контакта твердой и жидкой фаз F может быть определена по формуле:

$$F = V/\delta,$$

где V — объем карьерных вод, м^3/с; δ — толщина диффузного пограничного слоя, м.

Значение толщины диффузионного пограничного слоя δ зависит от гидродинамических условий вблизи твердой фазы (горная масса), к которым относятся скорость движения жидкой фазы, размер частиц твердой фазы, температура и вязкость жидкой фазы.

В результате уравнение массоотдачи для соединений азота при их вымывании из горной массы приводится к виду:

$$M_n/t = K_n V,$$

где M_n/t — масса выноса конкретного соединения азота (в расчете на аммонийный, нитритный и нитратный азот), кг/с; K_n — коэффициент, косвенно характеризующий гидродинамические условия и свойства выносимого соедине-

Результаты раздельного расчета массы выноса поступающих соединений азота в дренажные воды от растворения ВВ в скважинах и вымывания сорбированных оксидов азота из асбестсодержащей руды

Год	Количество аммиачной селитры в израсходованных ВВ, т/год	Суммарная масса соединений азота в карьерных дренажных водах (ионы NH_4^+, NO_2^-, NO_3^-), т/год	Масса поступления соединений азота от растворения в скважинах (ионы NH_4^+, NO_3^-), т/год	Масса поступления соединений азота от вымывания оксидов азота из асбестсодержащей руды (ионы NO_2^-, NO_3^-), т/год	Отношение массы соединений азота от растворения в скважинах к массе аммиачной селитры, %	Отношение массы соединений азота от вымывания оксидов азота из асбестсодержащей руды к массе аммиачной селитры, %
2006	12428	842,4	370,5	471,9	3,0	3,8
2007	10646	1015,8	359,5	656,3	3,4	6,2
2008	11113	978,0	370,5	607,5	3,3	5,5
2009	10485	908,1	339,3	568,8	3,2	5,4
2010	11333	703,5	344,6	359,0	3,0	3,2
2011	11406	787,5	322,8	464,7	2,8	4,1
2012	11775	651,9	277,2	374,7	2,4	3,2
2013	8857	720,0	412,3	307,7	4,7	3,5
2014	7685	976,2	356,1	620,1	4,6	8,1
2015	6754	688,1	194,9	493,2	2,9	7,3
2016	5193	830,1	219,9	610,2	4,2	11,7
2017	4972	879,7	151,3	728,4	3,0	14,6
Итого за период	112647	9981,4	3718,9	6262,5	3,4	6,4

ния азота, $K_n = DC_{нас}/\delta^2$; V — объем карьерных вод за рассматриваемый период, м^3/с.

Составив на основе результатов производственного контроля и мониторинга в условиях горного предприятия уравнение зависимости массы выноса от объема карьерных вод и массы взрывчатых веществ для нитритного азота, а также таблицу (см. таблицу), можно моделировать поступление данного соединения в карьерные воды путем конкретных расчетов и принимать исходя из этого практические решения: необходимость или отсутствие необходимости очистки карьерных дренажных вод на перспективу; вид биологической очистки (аппаратурное оформление, преобладание в технологической схеме элементов аэробной или анаэробной очистки, требуемая производительность, интенсивность работы оборудования, использование процессов естественной нитрификации с выдержкой карьерных дренажных вод в отработанных горных выработках).

В статье [12] показано, что в условиях горных предприятий перспективным и экономически целесообразным является использование частично затопленных отработанных горных выработок в качестве биоинженерных сооружений для очистки карьерных вод от соединений азота. Эффективность очистки карьерных вод составляет в этом случае 95–97 %. Одним из факторов, определяющих возможность такого использования, является практическое отсутствие обратного оттока воды из отработанной горной выработки, в которой происходит очистка. В случае с породами, вмещающими хризотил-асбест, данное условие выполняется в том числе за счет высокой пластичности асбестсодержащих пород [13].

Внутреннее отвалообразование является достаточно распространенным способом отвалообразования на горных предприятиях, что объясняется отсутствием необходимости отчуждения земель под размещение внешних отвалов, а также снижением дальности транспортирования пустых пород. Одновременно с этим объемы внутреннего отвалообразования учитываются горными предприятиями (в случае разработки соответствующего проекта и его согласования надзорными органами) как объемы использования отходов путем рекультивации выработанного пространства, а следовательно, предприятия не вносят плату за негативное воздействие на окружающую среду при размещении этих отходов, как в случае внешнего отвалообразования.

При всех вышеуказанных преимуществах внутреннее отвалообразование приводит к поступлению в карьерный водоотлив токсичной нитритной формы азота (вымывание атмосферными осадками и подземными водами сорбированных взорванной горной массой оксидов азота), так как загрязненная горная масса не вывозится за пределы дренируемой области.

Сопоставление данных по объему внутреннего отвалообразования и загрязнения карьерных вод нитритным и нитратным азотом показывает взаимосвязь данных процессов — с увеличением массы пустых пород, размещенных во внутренних отвалах, увеличивается масса соединений азота в дренажных водах от вымывания из взорванной горной массы. Объемы внутреннего отвалообразования и загрязнение карьерных дренажных вод нитритным азотом на примере крупного горного предприятия – производителя хризотил-асбеста представлены ниже:

Год	2015	2016	2017
Масса пустых пород, размещенных во внутренних отвалах, тыс. т/год	3,035	6,128	9,600
Масса соединений азота от вымывания из горной массы (нитритный и нитратный азот), т/год	493,2	610,2	728,4

Внешнее отвалообразование за пределами дренируемой горными выработками области может являться фактором, косвенно снижающим поступление нитритного и нитратного азота в дренажные воды горных предприятий (при сохранении некоторого объема внутреннего отвалообразования).

Эколого-экономическая оценка влияния объемов внутреннего отвалообразования и внешнего отвалообразования на величину платежей предприятия за негативное воздействие на окружающую среду может являться одним из инструментов выбора технологии отвалообразования, а также принятия решения по выбору способа и аппаратурному оформлению биологической очистки для существующих условий конкретных горных предприятий.

Масса выносимого с карьерными дренажными водами нитритного азота зависит от трех основных факторов: объема ВВ на основе аммиачной селитры, объема карьерных дренажных вод и объема внутреннего отвалообразования. Совместный учет данных факторов может позволить горным предприятиям прогнозировать загрязнение карьерных вод нитритным азотом и выбирать соответствующие методы защиты окружающей среды от него (снижение объемов внутреннего отвалообразования, расчет производительности сооружений биологической очистки, использование процессов естественной нитрификации с выдержкой карьерных дренажных вод в отработанных горных выработках). При принятии решения об использовании для очистки карьерных вод отработанных горных выработок необходимо предварительно изучить гидрогеологические условия территории и физико-механические свойства пород (в рассмотренном случае — пластичность и водопроницаемость асбестсодержащих серпентинитов), слагающих борта отработанных горных выработок.

* * *

В статье изложены результаты исследований, проведенных в рамках хоздоговорной работы «Оптимизация экологических рисков при отработке нижних горизонтов карьера асбестовых руд», выполненной ООО «Экопром» по договору № 12-08/04/18 [14].

Библиографический список

1. Постановление Правительства Российской Федерации № 913 «О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах» от 13.09.2016 г. Интернет-ресурс http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_204671/.

2. Постановление Правительства Российской Федерации № 758 «О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду при размещении твердых коммунальных отходов IV класса опасности (малоопасные) и внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации» от 29.06.2018 г. Интернет-ресурс http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_301466/.

3. Вредные химические вещества. Неорганические соединения V–VIII групп : справ. изд. ; под ред. В. А. Филова [и др.]. — Л. : Химия, 1989. — 592 с.

4. ***Атавина, Т. М.*** В гармонии с природой / *Т. М. Атавина* // Вода Magazine. — 2018. — № 1 (125). — С. 8–11.

5. ***Евдокимова, Г.*** Плавающие биоплато для очистки сточных карьерных вод от минеральных соединений азота в арктических условиях / *Г. Евдокимова, Л. Иванова, Н. Мозгова, В. Мязин, Н. Фокина* // Экология и промышленность России. — 2015. — 19 (9). — С. 35–41.

6. ***Chlot, S.*** Nitrogen effluents from mine sites in Northern Sweden. Nitrogen transformations and limiting nutrient in receiving waters / *S. Chlot* // Онлайн-издание: http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:990076/FULLTEXT01.pdf.

7. ***Forsyth, B.*** Explosives and water quality / *B. Forsyth, A. Cameron, S. Miller* // (Электронное издание http://pdf.library.laurentian.ca/medb/conf/Sudbury95/GroundSurfaceWater/GSW16.PDF).

8. Solutions for control of nitrogen discharges at mines and quarries. (Электронное издание http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2015/T225.pdf).

9. ***Revey, G. F.*** Practical methods to control explosives losses and reduce ammonia and nitrate levels in mine water / *G. F. Revey* // Mining Engineering. — 1996. — July. — P. 61–64.

10. **Пат. 2341767 Российская Федерация.** Способ заряжания нисходящих обводненных скважин / Бондарь А. П., Нейманн В. Р., Мицук В. И., Мицук А. И. — № 2006146755/03 ; заявл. 26.12.06 ; опубл. 20.05.11, Бюл. № 14.

11. **Пат. 2195441 Российская Федерация.** Способ получения безводной смеси для водонаполненного взрывчатого вещества / Куничан В. А., Чащилов Д. В., Жуков Ю. Н., Аникеев В. Н., Соснин В. А., Янкилевич В. М., Жуков А. Н. — № 99127653/02 ; заявл. 24.12.99 ; опубл. 27.12.02, Бюл. № 36.

12. ***Студенок, Г. А.*** Геоэкологическое обоснование технологии очистки дренажных вод горного предприятия от соединений азота в отработанной горной выработке / *Г. А. Студенок* // Известия вузов. Горный журнал. — 2018. — № 3. — С. 32–39.

13. ***Вольфсон, Ф. И.*** Структуры рудных полей и месторождений : уч. пособие для вузов / *Ф. И. Вольфсон, П. Д. Яковлев* ; 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Недра, 1985. — 318 с.

14. Отчет по хоздоговорной работе по договору № 12-08/04/18 «Оптимизация экологических рисков при отработке нижних горизонтов карьера асбестовых руд». ООО «Экопром», Екатеринбург, 2018 г. ■

Получено 13.02.20

© А. В. Хохряков, Г. А. Студенок, А. Г. Студенок, А. М. Ольховский, 2020 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ