

ГОРНАЯ ЭКОЛОГИЯ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 504.06

СНИЖЕНИЕ НЕГАТИВНОГО ВЛИЯНИЯ ЗАКОНСЕРВИРОВАННОГО МЕДНОКОЛЧЕДАННОГО РУДНИКА УРАЛА НА СОСТОЯНИЕ ГИДРОСФЕРЫ

Л. С. Рыбникова, П. А. Рыбников, В. Ю. Наволокина

*Институт горного дела УрО РАН,
E-mail: luserib@mail.ru, ул. Мамина-Сибиряка, 58, 620219, г. Екатеринбург, Россия*

Предложены активные методы очистки шахтных вод, связанные с использованием различных современных технологических установок, таких как аэраторы и радиальные отстойники, которые обеспечивают повышение pH и снижение концентраций загрязняющих веществ в 10–50 раз. Пассивные методы очистки шахтных вод реализуются в виде каскада небольших прудов, обеспечивающих их дополнительную очистку за счет снижения скорости течения воды и увеличения времени взаимодействия загрязняющих веществ с реагентами. Реконструкция действующей системы с использованием трех ступеней очистки будет способствовать снижению загрязнения поверхностных и подземных вод, что позволит значительно улучшить экологическую обстановку и минимизировать ущерб гидросфере.

Гидросфера, медноколчеданное месторождение, загрязняющие вещества, кислые шахтные воды, аэраторы, радиальные отстойники, каскад прудов

DOI: 10.15372/FTPRPI20220318

За последние десятилетия горнодобывающая промышленность Свердловской области значительно увеличила расходы на борьбу с загрязнением окружающей среды. На формирование поверхностных вод старопромышленных районов заметно влияют отработанные и законсервированные медноколчеданные и угольные месторождения. Заброшенные шахты — серьезная угроза загрязнения во всем мире, основное внимание при этом должно уделяться содержанию металлов в шахтных водах. Шахтные воды образуются в результате химической реакции между водой, кислородом и серосодержащими минералами в горных породах [1]. Проблемы, связанные с шахтным дренажем, включают загрязнение гидросферы, нарушение роста и размножения водных растений и животных, а также деградацию земель [2]. Негативное воздействие состоит из разных форм ущерба окружающей среде и имеет не только краткосрочные последствия в ограниченном пространстве, но и весьма продолжительные (масштабные).

Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда “Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами” (тема № 22-27-20140).

Подземные воды как основные источники загрязнения образуются на медноколчеданных рудниках после прекращения шахтного водоотлива и дальнейшего выхода их на поверхность. Кислые шахтные воды закрытых предприятий горнопромышленного комплекса, попадая в открытые водные объекты, распространяются на сотни километров, понижая кислотность и увеличивая содержание металлов [3]. Многие реки Англии, Уэльса и Шотландии загрязняются кислыми шахтными водами остановленных угольных рудников, но, поскольку их отработка завершилась десятилетиями лет назад, собственники не несут юридической ответственности за последствия их закрытия. Решением данной проблемы занимается Агентство по охране окружающей среды и Управление по угляю [4]. Любой ущерб окружающей среде сопряжен с затратами. Например, в районе Аппалачей (Западная Вирджиния, США) стоимость работ с кислыми шахтными водами доступными технологиями оценивается в 5–15 млрд долл. США [5]. В Свердловской области на предотвращение экологической катастрофы, связанной с загрязнениями ближайших рек у заповедника “Денежкин Камень”, вызванных деятельностью Уральской горно-металлургической компаний, выделено ~1 млрд руб. [6]. Цель настоящей работы — разработка рекомендаций по снижению негативного воздействия на гидросферу в районе затопленного Левихинского рудника.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Левихинская группа медноколчеданных месторождений находится в Кировградском районе Свердловской области. Месторождения открыты в 20–30-х годах XX в. Эксплуатация проводилась открытым и подземным способами. С 2003 г. началось затопление горных выработок. К 2007 г. на северном фланге рудника в провале, в наиболее низкой точке горного отвода глубиной ~20 м, сформировался техногенный водоем, куда разгружаются кислые шахтные воды с расходом 120 м³/ч [7]. Система очистки включает станцию нейтрализации, где кислые шахтные воды перемешиваются с известковым молоком. Нейтрализованная вода попадает в пруд-осветлитель, в котором металлы и другие вредные компоненты оседают на дно. Вода из пруда повторно нейтрализуется перед сбросом в р. Левиху, затем по ее руслу попадает в р. Тагил (рис. 1).



Рис. 1. Схема двухступенчатого метода очистки кислых шахтных вод и состав воды в точках наблюдения: т. 14 — техногенный водоем (зона разгрузки), минерализация (г/л) $M_{10.1}$, $AlSO_4$, pH 3.6; т. 15 — сброс с пруда-осветлителя, $M_{1.5}$, $CaSO_4$, pH 4.4; т. 16 — устье р. Левихи, $M_{2.2}$, $CaSO_4$, pH 5.4; т. 17 — р. Тагил (выше сброса), $M_{0.1}$, $CaHCO_3$, pH 7.3; т. 18 — р. Тагил (ниже сброса), $M_{0.3}$, $CaSO_4$, pH 7.5; т. 19 — пруд артели старателей “Нейва”, $M_{2.4}$, $CaSO_4$, pH 6.1; т. 20 — сброс со станции нейтрализации, $M_{2.6}$, $CaSO_4$, pH 8.2

Состав вод в районе Левихинского медноколчеданного рудника анализируется на основе данных мониторинга с начала 1950-х годов до настоящего времени. С 2007 г. наблюдение за составом шахтных и подотвальных вод Левихинского медноколчеданного рудника осуществляется организацией, производящей нейтрализацию шахтных вод. Регулярно 1 раз в неделю определяются наиболее характерные для кислых шахтных вод показатели загрязнения: pH, Cu^{2+} , Zn^{2+} , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, Mn^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- , сухой остаток, взвешенные вещества, нефтепродукты и мышьяк. Для их анализа используется потенциометрический, фотометрический и гравиметрический методы [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На протяжении 13 лет (2007–2020 гг.) на затопленном Левихинском руднике действовала двухступенчатая схема очистки кислых шахтных вод, включающая нейтрализацию известковым молоком и отстаивание в пруду-осветлителе. Эффективность очистки сточных вод на очистных сооружениях определяется как

$$E = \frac{C_t - C_o}{C_t} 100\%,$$

где C_t , C_o — содержание загрязняющих веществ в сточной воде до очистки (техногенный водоем) и после очистки (устье р. Левихи) соответственно.

Применяемые в 2020 г. мероприятия по очистке шахтных вод (нейтрализация, отстаивание в пруду-осветлителе) достигали следующих показателей, %: железо — 90–97; медь — 67–90; цинк — 40–82; марганец — 32–74; очистка сульфат-иона в апреле 2020 г. была менее эффективной, составляя 50 % (табл. 1). Согласно нормативам качества воды, предельно допустимые концентрации для водоемов рыбохозяйственного значения (ПДК_{рх}) следующие, мг/л: Cu — 0.001; Fe — 0.1; Zn — 0.01; Mn — 0.01; SO_4 — 100 [9].

ТАБЛИЦА 1. Эффективность очистки и изменение содержания компонентов в техногенном водоеме, пруду-осветлителе и устье р. Левихи, мг/л

Месяц	Объект, показатель	2020 г.					2021 г.				
		Cu	Fe	Zn	Mn	SO_4	Cu	Fe	Zn	Mn	SO_4
Март	Техногенный водоем	14.9	1024	160	56	4662	21.7	990	214	55	6445
	Пруд-осветлитель	5.7	120	104	40	2172	3.9	13	96	38	3371
	Устье р. Левихи	4.9	101	96	38	2172	0.4	0.8	20	12.3	2115
	Кратность ПДК _{рх}	4900	1010	9600	3800	22	400	8	2000	1230	21
	Эффективность очистки, %	67	90	40	32	53	98	99	91	78	67
Апрель	Техногенный водоем	21	1005	216	50	944	17.6	1489	163	56	5913
	Пруд-осветлитель	2.6	65.8	40	8.8	1225	1.7	22	37	31	2699
	Устье р. Левихи	2.2	36.7	39.4	13.2	1429	0.5	17	19	16	2022
	Кратность ПДК _{рх}	2200	367	3940	1320	14	500	170	1900	1600	20
	Эффективность очистки, %	90	96	82	74	—	97	99	88	71	66
Май	Техногенный водоем	16.7	976	172	69	4980	18.2	1091	214	58	7945
	Пруд-осветлитель	5.7	46	80	29	2695	2.3	10	55	26	1798
	Устье р. Левихи	4.9	27	65	26	2450	0.05	0.6	10	13	1515
	Кратность ПДК _{рх}	4900	2700	6500	2600	25	50	6	1000	1300	15
	Эффективность очистки, %	71	97	62	62	51	99	99	95	78	81

Концентрации компонентов на сбросе в р. Тагил значительно превышали ПДК_{рх}: цинк — в 3940–17200 раз, медь — в 2200–16700, марганец — в 1320–6900, железо — в 367–9760, сульфат-иона — в 14–50 раз. С декабря 2020 г. вода после сброса из пруда-осветлителя направлялась в отработанный карьер артели старателей “Нейва”, т. е. в процесс очистки шахтных вод де-факто включен этап пассивной очистки. В результате концентрация компонентов на сбросе в р. Тагил снизилась (табл. 1): медь — до 0.04–0.5 мг/л (было 2.2–4.9 мг/л), железо — до 0.6–17 мг/л (27–101 мг/л), цинк — до 10–20 мг/л (35–96 мг/л), марганец — до 12–16 мг/л (13–38 мг/л), сульфат — до 1515–2115 мг/л (1420–2450 мг/л).

Включение этапа пассивной очистки привело к повышению эффективности очистки, которая составляет для железа 99 % (за период 2020 г. 90–97 %), для меди — 97–99 % (67–90 %), для цинка — 88–95 % (40–80 %), для марганца — 71–78 % (32–62 %) и для сульфат-иона — 66–81 % (ранее 51–53 %). Из-за применяемой в настоящее время системы очистки шахтных вод содержание загрязняющих компонентов, в первую очередь металлов, в устье р. Левихи уменьшилось. Тем не менее при сбросе в р. Тагил в воде р. Левихи по-прежнему наблюдаются превышения ПДК_{рх}: цинк в 1000–2000 раз, марганец в 1230–1600, медь в 50–500, железо в 6–170, сульфат-ионы в 15–21 раз (табл. 1). Несмотря на включение в систему этапа пассивной очистки, нормируемые показатели содержания основных загрязняющих компонентов не достигают предельно допустимых значений. Для повышения эффективности очистки на руднике необходима модернизация действующей системы.

Станция нейтрализации кислых шахтных вод эксплуатируется более 60 лет (реконструкция проведена 15 лет назад). Неэффективность ее работы связана с несоблюдением технологических регламентов, вызванных отсутствием достаточного количества нейтральной воды и плохим качеством извести [3]. Пруд-осветлитель, построенный в 1950-х годах, более чем наполовину заполнен шламами. Оставшегося объема недостаточно для отстаивания воды после нейтрализации.

Для очистки кислых шахтных вод целесообразно использование хорошо зарекомендовавшей себя системы с применением аэротенков FUCHS OxyStar [10]. Примером служит станция Tzschelln (Саксония, Германия), где с 2004 г. применяется очистка дренажных вод отработанных угольных шахт с концентрациями железа до 700 мг/л и pH 4–5. Очистная установка состоит из трех линий химической обработки, каждая из которых имеет шесть резервуаров аэрации для окисления железа. Расход воды составляет 3600 м³/ч. Для повышения pH и осаждения железа применяется известковое молоко (рис. 2).

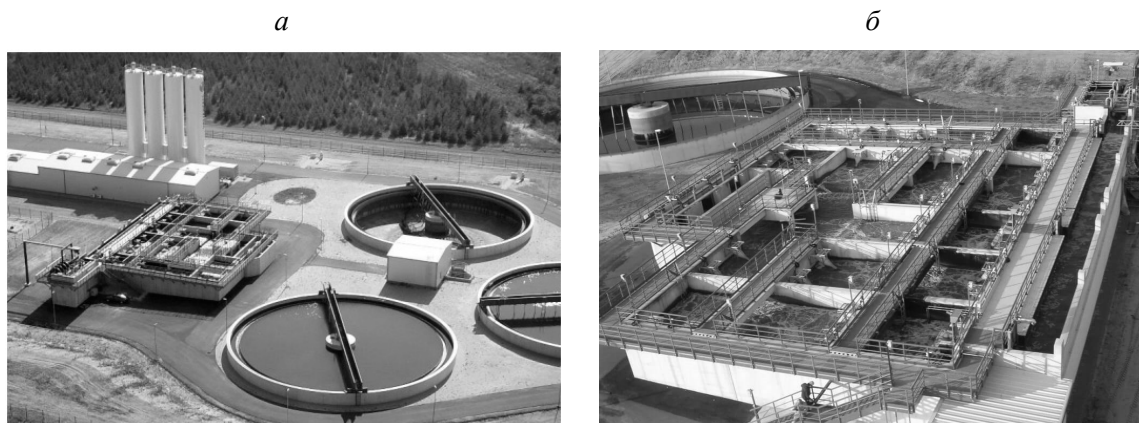


Рис. 2. Очистные установки Tzschelln: а — состоящие из трех линий химической обработки (радиальные отстойники и установка с аэротенками); б — состоящие из секций с аэротенками

Систему активной очистки целесообразно дополнить пассивной. Ее можно реализовать в виде каскада прудов на участке русла р. Левихи. Использование с декабря 2020 г. этапа пассивной очистки пруда артели старателей “Нейва” показало высокую эффективность.

Оценка необходимой общей площади каскада прудов и изменения концентраций загрязняющих веществ определяется зависимостью

$$A = \frac{Q_d (C_t - C_o)}{R_a}.$$

Здесь A — требуемая площадь пруда, м^2 ; Q_d — среднесуточный расход воды, $\text{м}^3/\text{сут}$; C_t , C_o — концентрация загрязняющих веществ на входе и при окончательном сбросе соответственно, мг/л ; R_a — скорость удаления загрязняющих веществ, $\text{г/м}^2/\text{сут}$ [11]. Для обеспечения инженерного запаса значения R_a в расчетах берутся для зимнего периода времени, а расход воды, подаваемой на нейтрализацию, принимается по данным паводковых замеров.

Эксплуатации для пассивной очистки только существующего пруда-осветлителя артели старателей “Нейва” недостаточно из-за его небольшой площади (12,9 га). Для достижения нужной степени очистки требуются пруды площадью 22 га. Целесообразно использовать два пруда-осветлителя, которые будут обеспечивать осаждение металлов вследствие снижения скорости течения воды и увеличения времени взаимодействия загрязняющих веществ с реагентами.

На основании приведенных характеристик технологических установок и расчетов предлагается следующая система очистки сточных вод на Левихинском руднике. Поток кислых шахтных вод и приготовленное на станции нейтрализации известковое молоко поступают в очистные сооружения, состоящие из четырех отсеков размерами 6×6 м (объем каждого 150 м^3), глубина воды 4 м. В первом и втором отсеках должны устанавливаться по два аэратора FUCHS OxyStar Aerators типа OS15 (11 kW), в третьем и четвертом — по одному. При использовании очистных сооружений с аэротенками (I ступень очистки) происходит повышение pH шахтной воды. В результате увеличения скорости перемешивания и времени взаимодействия кислых вод с известковым молоком образуется осадок. Затем вода перекачивается в отстойники радиального типа со встроенной камерой флокуляции (II ступень очистки). Флокулянты смешиваются с очищенными шахтными водами, приводя к нормализации pH воды и ее дополнительной очистке (рис. 3). После аэротенков и радиальных отстойников вода по напорному трубопроводу следует в каскад прудов (III ступень очистки), где происходит отстаивание воды и формирование осадка [2]. Очищенная вода поступает в р. Левиху и далее в р. Тагил (рис. 4).

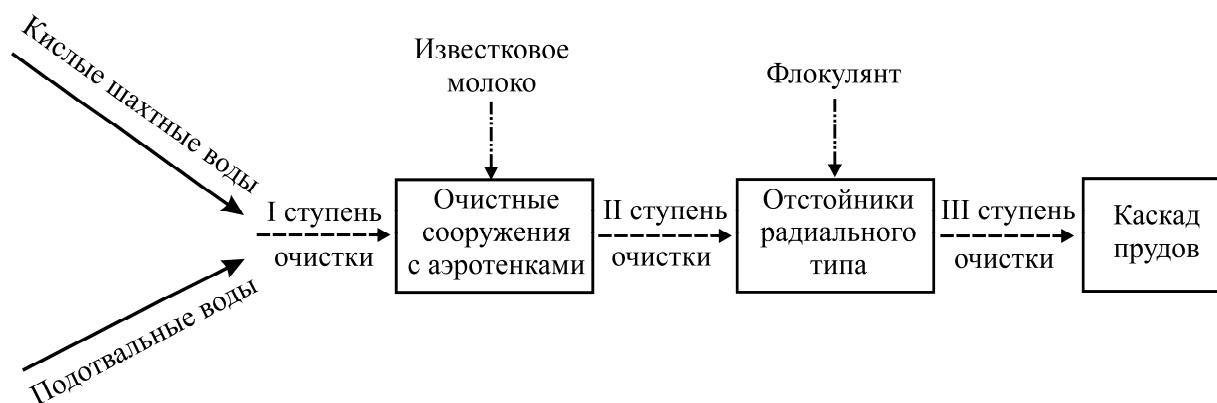


Рис. 3. Схема организации системы очистки кислых шахтных вод

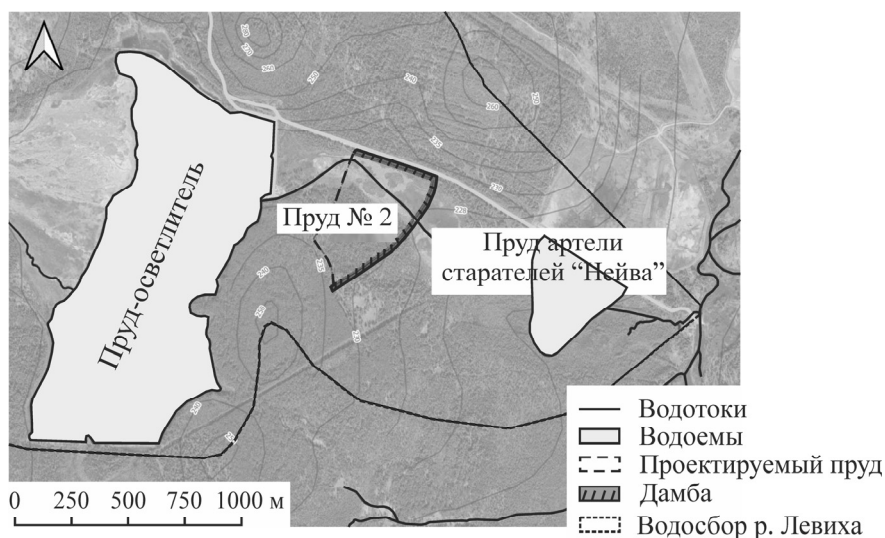


Рис. 4. Схема размещения каскада прудов-осветлителей в долине р. Левиха (существующий пруд-осветлитель площадью 101 га исключается из системы очистки)

Исходя из опыта применяемых на заводе Роннебург (Тюрингия, Германия) очистных сооружений с аэротенками производительностью $750 \text{ м}^3/\text{ч}$ по трем линиям, на Левихинском руднике достаточно использовать одну линию с аэротенками производительностью $250 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($4.1 \text{ м}^3/\text{мин}$). Производительность радиальных отстойников типа ОРСВ-200 составляет $200 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($3.3 \text{ м}^3/\text{мин}$) [12].

По результатам эксплуатации аэраторов FUCHS выявлено, что очистка имеет эффективность 99 % (содержание Mn от 600 мг/л на входе и до 3 мг/л на выходе). Однако нейтрализация кислых шахтных вод за счет аэрации будет ограничена. Достичь высокой скорости химических реакций, увеличить эффективность очистки воды и сократить объем аэротенков можно с помощью камеры флокуляции. Эффективность отстойников радиального типа в этом случае 80 – 99 % [13].

Реконструкция действующей системы очистки шахтных вод с использованием трех ступеней очистки (нейтрализация в аэротенках, радиальные отстойники и каскад прудов) будет способствовать снижению загрязнения поверхностных и подземных вод (табл. 2). Приведенные расчеты демонстрируют повышение степени очистки исходных кислых шахтных вод предложенным способом до показателей, близких к нормативам качества воды для рыбохозяйственных водоемов по содержанию железа, марганца, меди и цинку.

ТАБЛИЦА 2. Концентрации загрязняющих веществ при реализации трехступенчатой системы очистки, мг/л

Система очистки		Fe	Mn	Cu	Zn	SO ₄
Кислые шахтные воды		2319	77	97	176	10158
I ступень	Очистные сооружения с аэротенками	232	7.7	20.4	77.3	2946
II ступень	Радиальный отстойник	46	1.5	4.1	15.5	589
III ступень	Пруд № 2	<0.1	<0.01	<0.001	<0.01	143
	Пруд артели старателей "Нейва"	<0.1	<0.01	<0.001	<0.01	<100

ВЫВОДЫ

Начиная с 2007 г. для снижения экологической нагрузки на гидросферу и предотвращения поступления неочищенных кислых вод в водотоки на затопленном Левихинском медноколчеданном руднике организована двухступенчатая система очистки кислых шахтных вод. Технология очистки включала нейтрализацию кислых шахтных вод известковым молоком и отстаивание в пруду-осветлителе. С декабря 2020 г. в существующую систему очистки добавлена третья ступень пассивной очистки: отстаивание в пруду-осветлителе (отработанный карьер артели старателей “Нейва”) перед сбросом в русло р. Левихи.

Использование пассивной очистки во втором пруду-осветлителе привело к повышению эффективности очистки. Содержание загрязняющих в устье р. Левихи перед сбросом в р. Тагил снизилось, однако по-прежнему отмечаются значительные превышения нормативов.

Для повышения эффективности очистки необходимо модернизировать существующую систему: реконструировать работающую станцию нейтрализации, вывести из эксплуатации действующий пруд-осветлитель, использовать активные (аэраторы, радиальные отстойники) и пассивные (каскад прудов ниже сброса нейтрализованных сточных вод) системы очистки. Трехступенчатая система очистки (аэротенки, радиальные отстойники; каскад прудов) будет способствовать снижению загрязнения поверхностных и подземных вод до нормируемых значений, что позволит значительно улучшить экологическую обстановку и уменьшить ущерб гидросфере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыбникова Л. С., Рыбников П. А., Тарасова И. В. Геоэкологические проблемы использования выработанных карьерных пространств на Урале // ФТПРПИ. — 2017. — № 1. — С. 170–181.
2. Kornilkov S., Antoninova N., and Sobenin A. Assessment of the sorption potential of the plant *l. Sativum* l. In the process of formation of the biogeochemical barrier, E3S Web of Conf., 8th Int. Scientific Conf. “Problems of Complex Development of Georesources”, 2020. — P. 04020.
3. Рыбникова Л. С., Наволокина В. Ю. Обоснование мероприятий по минимизации воздействия кислых шахтных вод на гидросферу (на примере Левихинского медноколчеданного месторождения, Свердловская область) // ГИАБ. — 2021. — № 5-2. — С. 245–256.
4. Johnston D., Potter H., Jones C., Rolley S., Watson I., and Pritchard J. Science report — abandoned mines and the water environment, Environment Agency, 2008. — 32 p.
5. Mining and water quality. URL: <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/mining-and-water-quality> (дата обращения 03.02.2022 г.).
6. УГМК занялась очисткой рек вблизи заповедника “Денежкин Камень”. URL: <https://www.justmedia.ru/analitika/society/teper-kollegi-a-ne-vragi-ugmk-zanyalsya-ochistkoy-rek-vblizi-zapovednika-denezhkin-kamen> (дата обращения 03.02.2022 г.).
7. Рыбникова Л. С., Рыбников П. А. Закономерности формирования качества подземных вод на отработанных медноколчеданных рудниках Левихинского рудного поля (Средний Урал, Россия) // Геохимия. — 2019. — Т. 64. — № 3. — С. 282–299.
8. Rybnikova L. and Navolokina V. Analysis and feasibility of measures to minimize the impact of acid mine waters discharged by abandoned copper-sulphide mines on hydrosphere of the Tagil river, E3S Web of Conf., 2020, Vol. 177. — P. 04009.

9. **Нормативы** качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. — М.: ВНИРО, 2011. — 257 с.
10. **FUCHS** Mine water treatment. Case studies, 2021. URL: https://www.fuchswater.com/wp-content/uploads/2021/01/FUCHS_Mine_Water_Treatment_Case_Studies_2021-01.pdf (дата обращения 04.02.2022 г.).
11. **PIRAMID consortium**. Engineering guidelines for the passive remediation of acidic and/or metalliferous mine drainage and similar wastewaters, European Commission 5th Framework RTD Project no. EVK1-CT-1999-000021 “Passive in-situ remediation of acidic mine/industrial drainage”, Newcastle Upon Tyne UK, 2003. — 166 p.
12. **НПО ЭКОСИСТЕМА**. Отстойник радиальный высокой производительности для очистки сточных вод — ОРСВ. https://eco-systema.com/productions/modules/Otstoynik_ORSV (дата обращения 05.02.2022 г.).
13. **Долина Л. Ф.** Современная техника и технологии для очистки сточных вод от солей тяжелых металлов. — Днепропетровск: Континент, 2008. — 254 с.

Поступила в редакцию 28/III 2022

После доработки 18/IV 2022

Принята к публикации 06/V 2022