

ГОРНАЯ ЭКОЛОГИЯ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 504.054

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВА ПОДОТВАЛЬНЫХ ВОД МЕДНОКОЛЧЕДАННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СРЕДНЕГО УРАЛА

Л. С. Рыбникова, П. А. Рыбников, А. Н. Галин

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

Рассмотрена концентрация химических элементов в подотвальной воде в зависимости от сезона и климатических условий. Особенности состава подотвальных вод проанализированы по сравнению с химическим составом пород отвала с помощью их водной и кислотной вытяжек. Для большинства изученных элементов наблюдается хорошая корреляция между их содержанием в кислотной вытяжке и содержанием в породе отвала. При этом результаты водной вытяжки не могут использоваться в качестве надежного основания для прогноза состава подотвальных вод.

Левихинский рудник, медноколчеданное месторождение, загрязняющие вещества, отвалы, подотвальные воды, вмещающие породы, минеральный состав, химический состав, кларк концентрации, коэффициент опасности

DOI: 10.15372/FTPRPI20230216

Горнодобывающая деятельность сопровождается образованием различных техногенно-минеральных образований, в частности отвалов вскрышных пород, забалансовых руд и т. д. Отвалы негативно влияют на разные элементы окружающей среды, приводя к отчуждению плодородных участков земли; повышению пылевой нагрузки в результате ветровой эрозии; загрязнению почв вследствие аэротехногенного переноса; загрязнению поверхностных и подземных вод подотвальными водами. По вещественному составу отвалы медно-колчеданных месторождений относятся к объектам, негативное влияние которых на окружающую среду проявляется в наибольшей степени.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИГД УрО РАН № 075-00412-22 ПР. Тема 2. Разработка геоинформационных технологий оценки защищенности горнопромышленных территорий и прогноза развития негативных процессов в недропользовании (FUWE-2022-0002) г. р. № 123012300006-0 и за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-20140, <https://rscf.ru/project/22-27-20140/>.

На территории Свердловской области основным объектом накопленного негативного влияния — территория отработанного Левихинского месторождения. С 1927 г. вскрышные породы, окисленные и сульфидные забалансовые руды складировались в отвалы на естественном неподготовленном основании. На протяжении 100 лет происходило интенсивное выщелачивание минералов пород отвалов, приводящее к загрязнению прилегающей территории, поверхностных и подземных вод. В процессе инфильтрации атмосферных осадков в теле отвала вода, обогащенная кислородом, контактирует с вмещающими породами и насыщается металлами, сульфат-ионом и иными компонентами. Отмечается непрерывное формирование кислых подотвальных вод, негативно влияющих на водные объекты, а также на флору и фауну прилегающих территорий.

Цель настоящей работы — изучение взаимосвязи состава пород отвала и подотвальных вод, выявление процессов, протекающих в теле отвала и приводящих к формированию специфического химического состава кислых подотвальных вод. Выполнен анализ минералогического и химического состава пород отвала, водной и кислотной вытяжки, определено изменение состава подотвальных вод и установлены связи между составом пород отвала и составом подотвальных вод.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Левихинская группа медноколчеданных месторождений находится в Кировградском районе Свердловской области (рис. 1). Месторождения открыты в 1920–1930 гг. XX в. В 1927 г. начата эксплуатация открытым, позднее — разработка месторождений подземным способом. В 2003 г. водоотлив на руднике остановлен и началось затопление горных выработок, которое в 2007 г. завершилось формированием сосредоточенного выхода кислых шахтных вод в самой низкой точке горного отвода с расходом до 2.9 тыс. м³/сут.

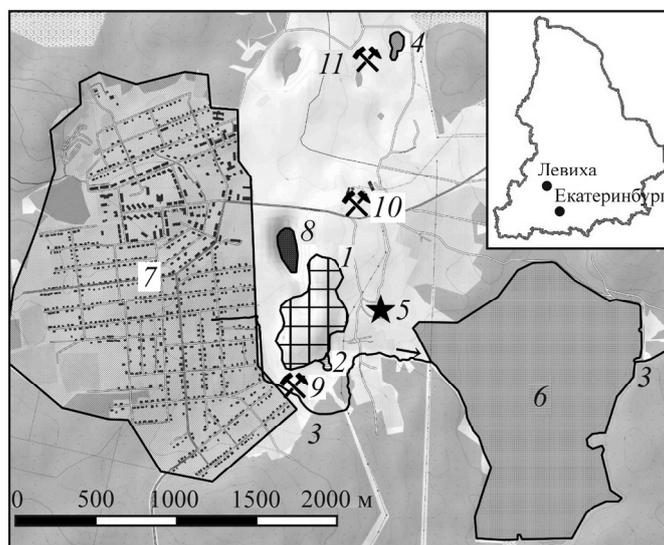


Рис. 1. Схема расположения отвала в районе отработанного Левихинского медноколчеданного рудника: 1 — отвал; 2 — место сброса подотвальных вод; 3 — русло р. Левиха; 4 — место сброса шахтных вод; 5 — станция нейтрализации; 6 — пруд-осветлитель; 7 — п. Левиха; 8 — карьер “Левиха-IX”; 9 — шахта “Левиха-XII”; 10 — шахта “Центральная”; 11 — шахта “Левиха-II”

На территории Левихинского рудного поля расположено 11 отвалов общей площадью 0.3 км² и объемом 1.7 млн м³. Самый большой, площадью 22.6 га и объемом 1.45 млн м³, находится в южной части возле шахты “Левиха-XII” [1]. Здесь в течение нескольких десятков лет

сбрасываются кислые подотвальные воды, расход которых в паводок достигает 1250 м³/сут. Отдельный сбор подотвальных вод не осуществляется. Стекая с бортов карьера по периметру, вода накапливается в месте основного сброса подотвальных вод и попадает в русло р. Левиха, затем поступает в пруд-осветлитель. Севернее в пруд со станции нейтрализации сбрасывается нейтрализованная шахтная вода со средним расходом 2,9 тыс. м³/сут. В пруду-осветлителе происходит выпадение в осадок загрязняющих компонентов. Очищенные шахтные воды сбрасываются из пруда-осветлителя в русло р. Левихи и далее в р. Тагил [2].

Отвалы сложены пустыми вмещающими породами, содержащими вкрапленные сульфиды (преимущественно пирит, халькопирит, сфалерит, марказит), и вскрышными породами, представленными амфиболитами и серицитовыми сланцами [1, 3].

В теле отвала формируются и накапливаются водорастворимые вторичные минералы или неосульфаты. Процессы окисления, гидролиза и испарения приводят к формированию ряда сульфатных солей, которые включают продукты выветривания сульфидов. Основными являются минералы, содержащие железо (ярозит $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$, кокимбит $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$), а также семиводные сульфаты, аналогичные мелантериту, но с переменным соотношением четырех главных металлов — железа, меди, цинка, магния: мелантерит $Fe(SO_4) \cdot 7H_2O$, бутит $Cu(SO_4) \cdot 7H_2O$, госларит $Zn(SO_4) \cdot 7H_2O$, эпсомит $Mg(SO_4) \cdot 7H_2O$. Повышенной растворимостью характеризуются сульфаты из групп мелантерита, розенита, эпсомита, галотрихита, копиапита [4].

Из-за механических процессов при добыче породы дробятся и разрушаются. Это приводит к увеличению фильтрационных свойств, увеличению поверхности взаимодействия пород и агентов выветривания. По всей поверхности отвала происходит практически полное поглощение атмосферных осадков, обогащенных кислородом.

При достаточном увлажнении поверхностного мелкозема запаса влаги в нем будет достаточно, чтобы обеспечить образование сульфатов на поверхности отвала [5]. Сульфаты накапливаются, образуя эфемерные выцветы, корки; при обильных дождях они растворяются и соли вместе с нисходящими фильтрационными потоками питают кристаллы и сталактиты, растущие в полостях внутри отвала. Избыточное разбавление сульфатных рассолов в поверхностном горизонте вызывает окисление и гидролиз сульфатов окиси железа. В результате этого постоянно действующего цикла “испарение – капиллярный подъем – кристаллизация сульфатов – растворение – вынос сульфатов в растворе – частичное осаждение железа в виде лимонита” в верхней части отвала формируется Fe-латерит, представленный лимонитовым панцирем и горизонтом брекчий с лимонитовым цементом. Ниже лимонитовой зоны наблюдается копиапитовая зона, в которой в состав гидросульфатов входят Fe^{2+} и Fe^{3+} , свидетельствуя об относительно высоких значениях рН и окислительно-восстановительного потенциала Eh (копиапит образуется при рН > 5). Ниже располагается зона накопления FeCuZn-мелантеритов, включающая подзону сталактит-сталагмитового накопления сульфатов (инфильтрационных нисходящих потоков) и друзовых сульфатов (подтопления, застойных вод). Самые нижние горизонты отвалов с большой мощностью могут содержать участки, обогащенные вторичными сульфидами (рис. 2) [5]. Отвал представляет собой сложно построенный геохимический фильтр. Процессы, протекающие в его теле, приводят к смене окислительно-восстановительных условий, формированию нескольких геохимических барьеров и определенной гидрогеохимической зональности [6]. Во всех этих процессах фактор времени играет важную роль. Он проявляется в двух диалектически противоположных тенденциях. Во-первых, растворы усложняют свой состав при вовлечении в геохимическую миграцию литофилов: магния, алюминия, натрия и калия. Во-вторых, со временем возрастает степень разделения, дифференциации химических элементов, мигриру-

ющих в ионной форме в сульфатных растворах, благодаря циклическим осаждению и мобилизации на геохимических барьерах. В связи с этим увеличивается количество $\text{FeMg}[\text{SO}_4] \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, появляются собственные минералы литофилов: эпсомит $\text{Mg}[\text{SO}_4] \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, алуноген $\text{Al}_2[\text{SO}_4] \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, мирабилит $\text{Na}_2[\text{SO}_4] \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, галотрихит $\text{FeAl}_2[\text{SO}_4]_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$. Возрастает доля сульфатов, в состав которых входит трехвалентное железо: копиапита $\text{FeFe}_4[\text{SO}_4]_6(\text{OH})_2 \cdot 20\text{H}_2\text{O}$, кокимбита $\text{Fe}_2[\text{SO}_4]_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ [5].

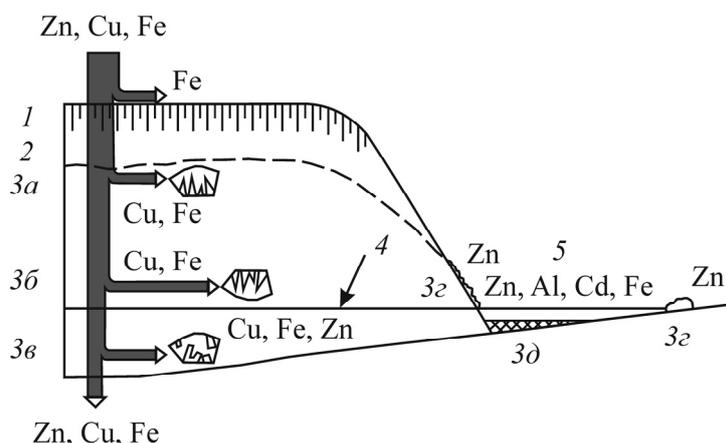


Рис. 2. Внешний отвал как геохимический фильтр: 1 — лимонитовая корка и брекчии с лимонитовым цементом; 2 — копиапитовая зона; 3 — мелантеритовая зона: а — конусные сталактиты; б — цилиндрические сталактиты; в — друзовые выделения и брекчии с мелантеритовым цементом; з — сульфаты капиллярной каймы; д — донные сульфаты; 4 — уровень приотвальных вод; 5 — приотвальная мочажина

Поскольку тело отвала расположено выше поверхности земли, между внутренней частью отвала и поверхностью существует температурный градиент, который зависит от сезона и времени суток. Это приводит к изменению растворимости минералов в зависимости от сезона и времени суток. В теле отвала происходит циклический процесс окисления, растворения, осаждения минералов, что способствует формированию специфического гидрохимического состава вод, которые сбрасываются по периметру отвала [7].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа состава пород отвала и подотвальных вод Левихинского рудника использовались результаты работ, выполненных в 2020–2021 гг. лабораторией геоинформационных и цифровых технологий в недропользовании Института горного дела УрО РАН по заданию Министерства природных ресурсов и экологии Свердловской области.

В соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-2017 [8] отобрано 12 проб пород отвала (рис. 3). Опробование осуществлялось точечным способом в сухую погоду. Минералогический состав пород получен по данным дифрактометрического анализа. Анализы проводились в секторе наноминералогии и в центре коллективного пользования уникальным научным оборудованием Пермского государственного национального исследовательского университета. Анализы химического состава пород отвала, водных и кислотных вытяжек с использованием азотной кислоты выполнены в аналитическом сертификационном испытательном центре Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН (г. Черноголовка). Результаты водной и кислотной вытяжки получены по данным атомно-эмиссионного и масс-спектрального анализов. В каждой вытяжке определено по 67 компонентов.

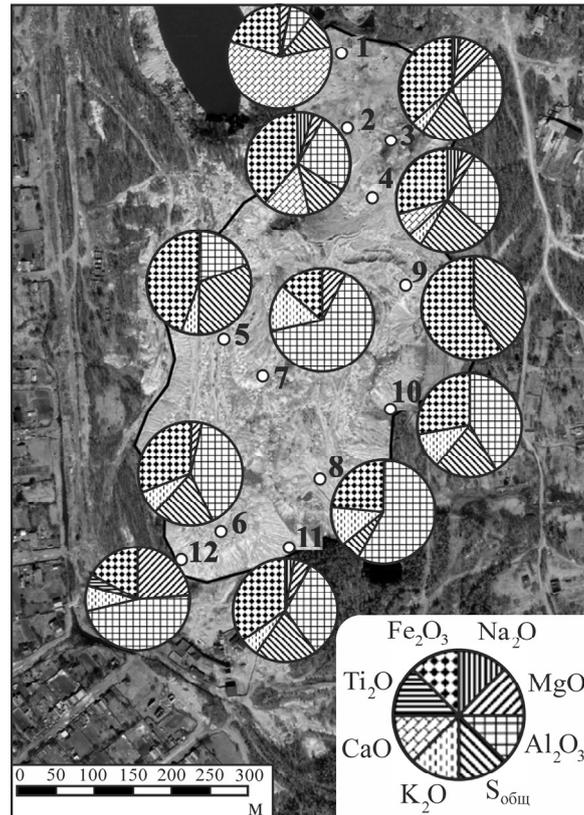


Рис. 3. Расположение точек отбора проб 1 – 12 из отвала и их химический состав

Состав подотвальных вод анализировался в наблюдательной точке в месте сброса подотвальных вод (рис. 1). В соответствии с ГОСТ Р 59024-2020 [9] отобрано пять проб: две в летний период, две в осенний и одна в весенний. Определялись pH, H^+ , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , $Fe_{общ}$, Fe^{2+} , Fe^{3+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Si, Be, Cd (AA), Co, As, Ni, Pb, Se, сухой остаток, минерализация, SiO_2 , окисляемость и жесткость. Состав подотвальных вод получен по данным следующих методов: пламенно-эмиссионной спектрометрией, пламенно атомно-абсорбционной, фотометрической с реактивом Грисса, потенциометрической с ионоселективным электродом, гравиметрическим, меркуриметрическим, титриметрическим, масс-спектрометрией с ионизацией в индуктивно связанной плазме. Анализы проведены в химико-аналитическом центре Института промышленной экологии УрО РАН.

Для анализа полученного массива данных использовались безразмерные показатели. В качестве величин, относительно которых нормируются анализируемые показатели, могут использоваться предельно допустимые значения для водоемов рыбохозяйственного значения (ПДК_{рх}) и почв (ПДК_п), а также кларковые значения — средние содержания в гидросфере и литосфере [10–13].

Рассматривались два показателя: коэффициент опасности $K_0 = C_i / C_{ПДК}$; кларк концентрации $K_k = C_i / C_k$ (C_i — концентрация i -го вещества; $C_{ПДК}$ — предельно допустимая концентрация i -го вещества; C_k — кларковое значение i -го вещества). Для дальнейшего анализа системы “подотвальная вода – порода отвала” выбирался ряд элементов, концентрации которых превышают:

- 1) ПДК_{рх} в подотвальной воде: Al, As, Be, Ca, Cd, Co, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, S, Se, Zn;
 2) кларковые значения для речной воды: Al, As, Be, Ca, Cd, Co, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, S, Se, Zn;
 3) ПДК_п в породе отвала: As, Cd, Pb, Zn (I класс опасности); Cu, Ni, Sb (II класс опасности); V (III класс опасности);
 4) кларковые значения для почвы: As, Cd, Pb, Se, Zn (I класс опасности); Co, Cu, Mo, Sb (II класс опасности); Mn, V, W (III класс опасности); Te (класс опасности не установлен, значение K_k варьирует от 1300 до 7000, самое большое из всех рассчитанных).

Всего отобрано 20 химических элементов: Al, As, Be, Ca, Cd, Co, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, S, Sb, Se, Te, V, W, Zn. В пробе 1 водной вытяжки значения концентрации значительно ниже по сравнению с остальными пробами и расходятся с результатами кислотной вытяжки для этой же пробы. Видимо, произошла систематическая ошибка анализов, поэтому данные пробы 1 водной вытяжки исключены из обработки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Химические анализы проб, отобранных в ручьях, текущих с отвала, показывают сильно кислую реакцию среды (рН 1.92–2.35), состав воды сульфатный магниевое-алюминиево-железистый, минерализация варьирует от 13 до 52 г/л, воды имеют высокую концентрацию сульфат-иона (10–39 г/л), железа (1.5–8.7 г/л), алюминия (0.6–2.9 г/л), магния (0.4–1.7 г/л), меди (0.09–0.3 г/л), цинка (0.1–0.3 г/л) (табл. 1, 2).

ТАБЛИЦА 1. Состав подотвальных вод

Дата опробования	Формула Курлова
04.08.2020 г.	M23.5 $\frac{SO_4 100}{Fe^{3+} 46Al31Mg17}$ pH 2.22 T 18.1 °C Eh 566 mV
13.10.2020 г.	M52.1 $\frac{SO_4 100}{Fe^{3+} 56Al22Mg17}$ pH 2.32 T 8.5 °C Eh 554 mV
14.04.2021 г.	M13.0 $\frac{SO_4 100}{Fe^{3+} 36Al34Mg19}$ pH 2.35
04.08.2021 г.	M44.0 $\frac{SO_4 99}{Al42Fe^{3+} 41Mg14}$ pH 1.92 T 25 °C Eh 300 mV
24.09.2021 г.	M38.5 $\frac{SO_4 99}{Fe^{3+} 42Al31Mg22}$ pH 2.26 T 14.4 °C Eh 281 mV

При относительно небольших колебаниях рН состав воды существенно зависит от сезона (табл. 2, рис. 4): максимальные содержания всех компонентов отмечены в межень (опробование 13.10.2020 г.), минимальные — в паводок (опробование 14.04.2021 г.).

ТАБЛИЦА 2. Концентрация компонентов в подотвальной воде в зависимости от сезона года и осадков

Дата опробования	Количество осадков [14]	Концентрация по компонентам, мг/л					
		S	Fe _{общ}	Al	Cu	Zn	Mn
04.08.2020 г.	44*	5 875	3 180	1 051	150	121	64
13.10.2020 г.	2*	12 918	8 725	1 606	320	300	135
14.04.2021 г.	49**	3 271	1 460	584	94	97	35
04.08.2021 г.	17*	11 049	5 800	2 900	332	304	118
24.09.2021 г.	37*	9 830	4 800	1 690	212	194	91

* Дождевые осадки за предыдущие 7 сут, мм.

** Высота снежного покрова, см.

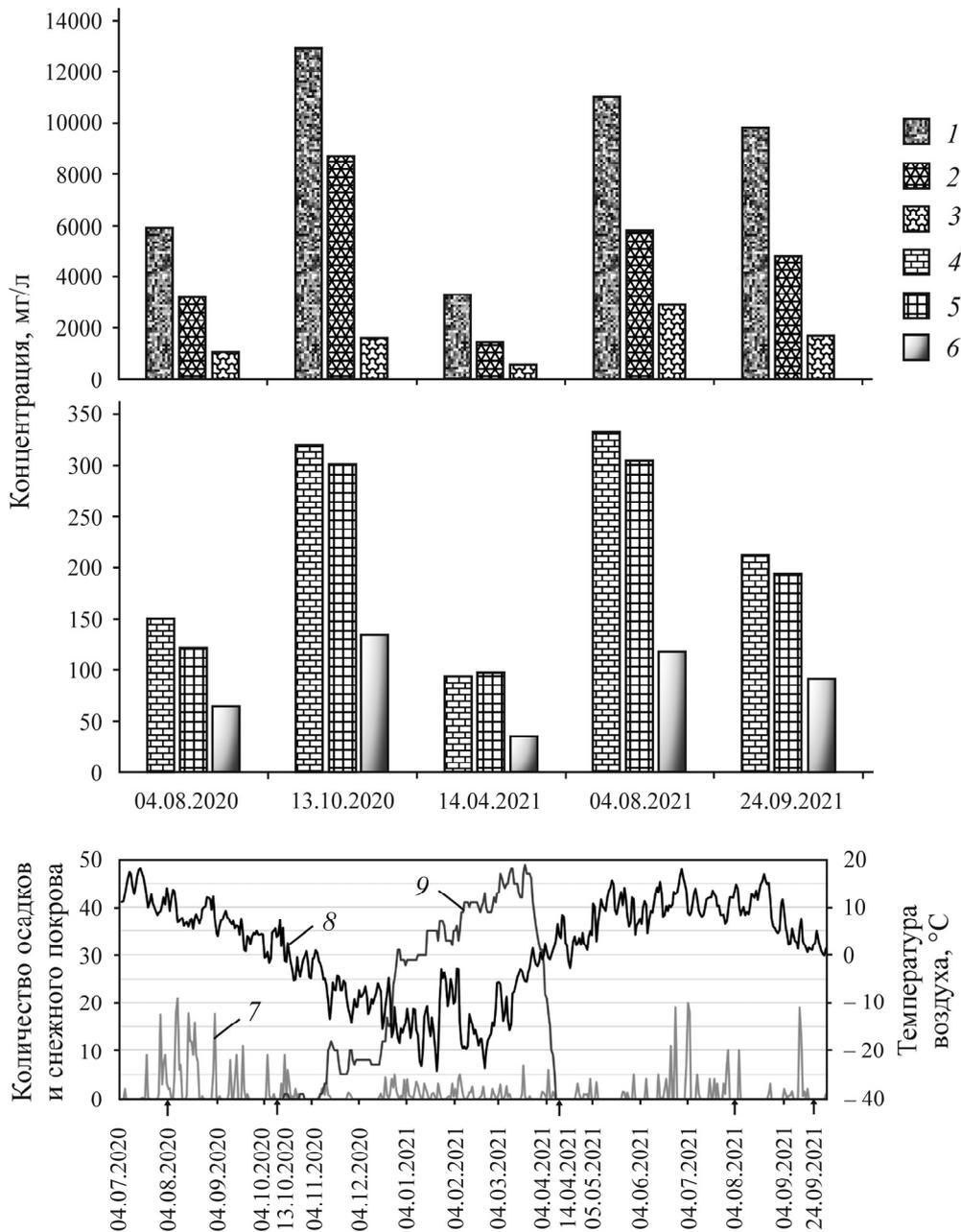


Рис. 4. Зависимость концентраций преобладающих компонентов в подотвальной воде от сезона года и осадков: 1 — сера; 2 — железо; 3 — алюминий; 4 — медь; 5 — цинк; 6 — марганец; 7 — количество осадков; 8 — снежный покров; 9 — температура воздуха

Данные опробования 13.10.2020 г. после засушливого периода (количество осадков в предыдущие дни 2 мм) показали значительный рост всех показателей. В апреле 2021 г. после резкого таяния снежного покрова концентрации уменьшились. Расход подотвальных вод в межень практически отсутствует, в паводок достигает $1250 \text{ м}^3/\text{сут}$. Площадь отвала составила 0.226 км^2 , количество осадков за 2019–2020 гг. — 581–590 мм. При условии, что все выпавшие на площадь отвала осадки поступают в его тело, среднегодовой расход подотвальных вод равен $365 \text{ м}^3/\text{сут}$ (4.2 л/с). Масса ежегодного выноса элементов составляет 26.5 т, в том числе более 1.1 т для серы, сотни килограммов железа и алюминия, десятки килограммов меди, цинка, марганца (табл. 3). За последние 50 лет, в течение которых отвал существует в том виде, как сей-

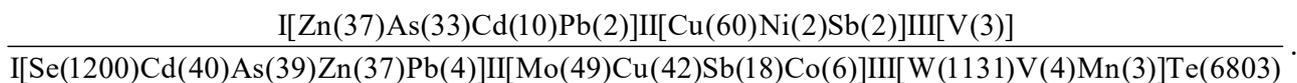
час, в окружающую среду поступило ~200 т загрязняющих веществ. Физико-химическое моделирование процессов формирования подотвальных вод Левихинского месторождения, выполненное с использованием программного кода Visual MINTEQ ver. 3.0/3.1, показало, что загрязнение окружающей среды кислыми водами может продолжаться сотни лет [6].

ТАБЛИЦА 3. Масса выноса элементов с подотвальными водами

Показатель	Элемент						Сумма
	S	Fe _{общ}	Al	Cu	Zn	Mn	
Среднее содержание, мг/л	8589	4793	1566	222	203	89	26528
Масса выноса, кг/год	1144	639	209	30	27	12	3534
Масса выноса за 50 лет, т	57.2	31.9	10.4	1.5	1.4	0.6	176.7

Отобранные пробы весьма разнообразны по минеральному составу и состоят преимущественно из кварца, полевых шпатов и глинистых минералов в разных пропорциях. Пробы 1 и 9 существенно отличаются от других проб: проба 1 имеет глинисто-сульфатно-карбонатный состав, проба 9 — кварцево-сульфидный. Во всех пробах (кроме пробы 9) зафиксировано присутствие хлоридных солей (сильвина и карналлита), сульфатов (бассанита и гипса). Наибольшее количество глинистых минералов (69 %) и минералов хлорсодержащих солей (10 %) отмечается в пробе 12. Сульфиды представлены преимущественно пиритом и отмечены также во всех образцах, кроме проб 8 и 12.

Химический состав пород отвала по отношению к ПДКп (числитель) и к кларкам (знаменатель) представлен в виде обобщенной ассоциации:



Здесь перед квадратными скобками — класс опасности элементов, справа от названия элемента — кратность превышения.

В табл. 4 приведены классы опасности, минимальные и максимальные коэффициенты опасности и кларки концентраций для элементов, обнаруженных в подотвальной воде и в породе отвала. ПДК для химических элементов пород отвала взяты для валовой формы. В табл. 5 и на рис. 5 представлены коэффициенты корреляции между содержанием элемента в кислотной вытяжке (КВ) и в породе отвала (ПО), между содержанием элемента в водной вытяжке (ВВ) и отвалом и содержанием элемента в кислотной вытяжке и водной вытяжке. Жирным шрифтом выделены коэффициенты больше 0.5. Высокие коэффициенты корреляции между кислотной вытяжкой и породой отвала имеют 75 % элементов. Между элементами в водной вытяжке и в породе отвала высокие коэффициенты корреляции наблюдаются в 35 %. Кроме того, можно отметить ряд элементов, которые имеют низкий коэффициент корреляции в обоих случаях: мышьяк, магний и марганец, а также лучше коррелирует с водной вытяжкой алюминий.

Для предотвращения дальнейшего поступления неочищенных кислых подотвальных вод в окружающую среду, в первую очередь в гидросферу, необходимо выполнить рекультивацию поверхности отвала, например, закрыв его геомембраной и почвенно-растительным слоем [16]. Это предотвратит поступление атмосферных осадков, обогащенных кислородом, в тело отвала и остановит циклический процесс сернокислотного выщелачивания сульфидов, осаждения и растворения продуктов их выветривания в техногенной зоне гипергенеза, каковым является тело отвала.

ТАБЛИЦА 4. Коэффициенты опасности и кларки концентрации для подотвальных вод и пород отвала

Элемент	Подотвальная вода					Породы отвала				
	Класс опасности [10]	Коэффициент опасности		Кларк концентрации		Класс опасности [15]	Коэффициент опасности		Кларк концентрации	
		min	max	min	max		min	max	min	max
Al	IV	14600	72500	3650	18125	—	—	—	0.04	1.2
As	III	5	10	130	250	I	2	33	2	39
Be	II	28	33	—	—	—	—	—	0.05	0.2
Ca	IV	0.2	2	3	27	—	—	—	0.1	8
Cd	II	90	156	2250	3900	I	0.1	10	0.2	40
Co	III	210	260	7 000	8667	II	1**	20**	0.3	6
Cu	III	93540	332200	13363	47457	II	1	60	0.7	42
Fe	IV	13040	86700	32600	216750	—	—	—	0.6	8
Mg	IV	11	42	154	579	—	—	—	0.01	3
Mn	IV	3527	13460	3527	13460	III	0.01	2	0.01	3
Mo*	III	—	—	—	—	II	—	—	3	49
Ni	III	92	110	368	440	II	0.1	2	0.02	0.7
Pb	II	0.15	0.35	0.9	2	I	0.1	2	0.2	4
S	—	99	389	861	3399	I	35	2197	12	748
Sb*	—	—	—	—	—	II	0.1	2	0.6	18
Se	II	39	45	390	450	—	—	—	16	1200
Te*	III	—	—	—	—	—	—	—	1318	6800
V*	III	—	—	—	—	III	0.1	3	0.1	4
W*	III	—	—	—	—	III	—	—	19	1131
Zn	III	9704	30370	4852	15185	I	1	37	0.4	24

*Не определялись в подотвальной воде.

**Использовался ПДК для подвижной формы.

Знак “—” означает отсутствие класса опасности, или ПДК, или кларкового значения.

ТАБЛИЦА 5. Коэффициенты корреляции между содержанием элемента в породе отвала, водной и кислотной вытяжке

Элемент	КВ – ПО	ВВ – ПО	КВ – ВВ
Al	0.5	0.7	0.9
As	0.3	0.1	0.9
Be	0.5	0.4*	0.9*
Ca	0.9	0.7	0.7
Cd	0.9	0.9*	0.9*
Co	0.9	0.9*	0.9*
Cu	0.9	0.7*	0.9*
Fe	0.9	0.1	0.3
Mg	0.5	–0.2	0.9
Mn	0.3	0.2*	0.9*
Mo	0.6	0.2	0.8
Ni	0.7	0.6	0.5
Pb	0.6	—**	—**
S	0.9	0.01	0.4
Sb	0.9	—**	—**
Se	0.9	—**	0.1
Te	0.6	—**	—**
V	0.5	—**	—**
W	0.9	—**	—**
Zn	0.9	0.6*	0.9*

*Первая проба водной вытяжки не учитывалась ввиду систематической ошибки.

**Коэффициент корреляции не определялся, так как много значений ниже предела определения.

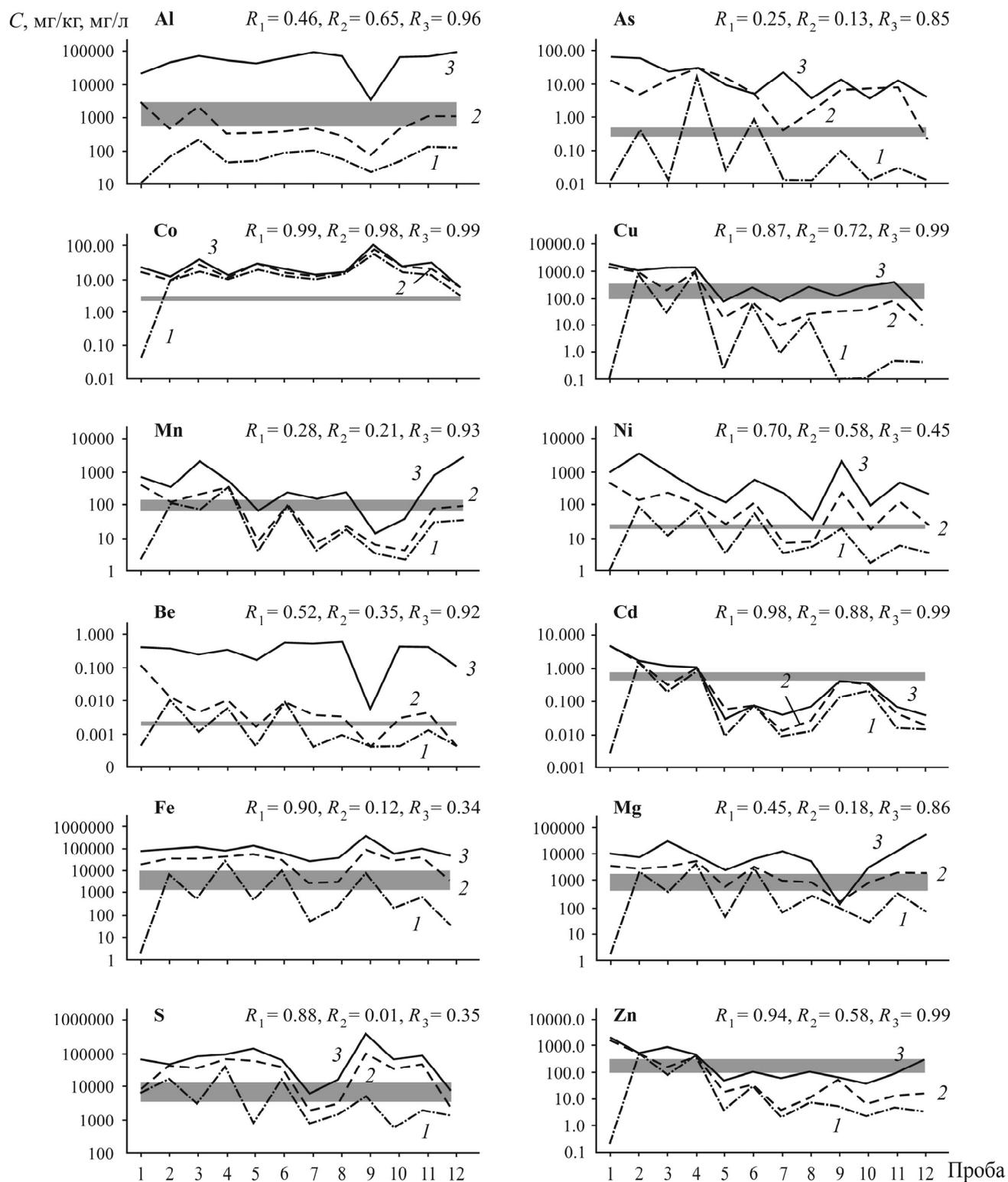


Рис. 5. Концентрация элементов в породах отвала, в кислотной и водной вытяжке и в подотвальной воде: 1 — водная вытяжка; 2 — кислотная вытяжка; 3 — порода отвала; серая область — диапазон значений в подотвальной воде; коэффициент корреляции R_1 — между кислотной вытяжкой и породой отвала, R_2 — между водной вытяжкой и породой отвала, R_3 — между кислотной и водной вытяжкой. При определении коэффициента корреляции первая проба водной вытяжки не учитывалась ввиду систематической ошибки

ВЫВОДЫ

Отвалы Левихинского рудника сложены вмещающими породами, содержащими вкрапленные сульфиды, и вскрышными породами, представленными амфиболитами и серицитовыми сланцами. В минеральном составе преобладают кварц, полевые шпаты и глинистые минералы, присутствуют сульфаты, хлоридные соли и сульфиды. В повышенных количествах по отношению к ПДК почв находятся медь и цинк (элементы I–III класса опасности).

Подотвальные воды кислые (до pH 1.92), высоко минерализованные (13–52 г/л), сульфатные магниево-алюминево-железистые с высокими содержаниями меди, цинка, марганца и кобальта. Состав воды зависит от сезона и осадков за предшествующие дни (в межень происходит увеличение в 3–5 раз), при этом pH не изменяется. Расход подотвальных вод во время паводка достигает 1250 м³/сут.

Для химических элементов, концентрации которых превышают ПДК и кларковые значения (Al, As, Be, Ca, Cd, Co, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, S, Sb, Se, Te, V, W, Zn), наблюдается хорошая корреляция между содержанием в кислотной вытяжке и в породе отвала, при этом корреляция между содержанием элемента в породе отвала и в водной вытяжке гораздо ниже. Для изучения химического состава отвалов как источника формирования подотвальных вод и прогноза качества подотвальных вод следует использовать анализ кислотной вытяжки, обеспечивающий более достоверные результаты.

Ежегодный вынос элементов с подотвальной водой в окружающую среду составляет более тонны серы, сотни килограммов железа и алюминия, десятки килограммов меди, цинка, марганца. За последние 50 лет общий объем выноса превысил сотни тонн; находящиеся в отвалах сульфиды будут продуцировать формирование кислых подотвальных вод в течение еще нескольких сотен лет.

Для предотвращения дальнейшего загрязнения окружающей среды необходимо выполнить рекультивацию поверхности отвала, закрыв его геомембраной с почвенно-растительным слоем, что приведет к полному прекращению формирования кислых подотвальных вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Техногенные месторождения Урала и оценка их воздействия на окружающую среду** / С. И. Мормилль, В. И. Сальников, Л. А. Амосов, Г. Г. Хасанова, А. И. Семячков, Б. Б. Зобнин., А. В. Бурмистренко; под ред. Ю. А. Боровкова. — Екатеринбург: НИИ-Природа, ДПР по Уральскому региону, ВНИИЗАРУБЕЖГЕОЛОГИЯ, 2002. — 206 с.
2. **Рыбникова Л. С., Рыбников П. А., Наволокина В. Ю.** Снижение негативного влияния законсервированного медноколчеданного рудника Урала на состояние гидросферы // ФТПРПИ. — 2022. — № 3. — С. 194–201.
3. **Рыбникова Л. С., Рыбников П. А., Наволокина В. Ю., Галин А. Н.** Гидрогеоэкологические аспекты изучения техногенных отходов отработанного Левихинского медноколчеданного рудника (Свердловская область) // Сергеевские чтения. Фундаментальные и прикладные вопросы современного грунтоведения. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. — М., 2022. — С. 428–433.
4. **Мальцев С. В., Чайковский И. И., Гришин Е. Л., Исаевич А. Г.** Исследование процессов окисления сульфидных минералов медно-никелевых месторождений // ФТПРПИ. — 2022. — № 2. — С. 128–139.

5. **Емлин Э. Ф.** Техногенез колчеданных месторождений Урала. — Свердловск: УрГУ, 1991. — 256 с.
6. **Rybnikov P. A. and Rybnikova L. S.** Formation of waste-rock drainage water on massive sulfide deposits of the Urals (Russia), 15th Water-Rock Interaction Int. Symp., WRI-15. *Procedia Earth Planetary Sci.*, 17, 2017. — P. 857–860.
7. **Алексеев В. А.** Причины образования кислых дренажных вод в отвалах сульфидсодержащих пород // *Геохимия*. — 2022. — Т. 67. — № 1. — С. 69–83.
8. **ГОСТ 17.4.4.02-2017.** Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа: принят межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 30.11.2017 г. № 52): дата введения 01.01.2019.
9. **ГОСТ Р 59024-2020.** Вода. Общие требования к отбору проб. Принят Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10.09.2020 г. № 640-ст: дата введения 01.08.2021.
10. **Нормативы** качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения: утверждены приказом Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13.12.2016 г. № 552 с изм. на 12.10.2018 г. — М.: ВНИРО, 2011. — 257 с.
11. **ГН 2.1.7.2041-06.** Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. Введен в действие постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 23.01.2006 г. № 1 с 01.04.2006 г.: дата введения 01.04.2006.
12. **Справочник** по геохимическим поискам полезных ископаемых / А. П. Соловов, А. Я. Архипов, В. А. Бугров и др. — М.: Недра, 1990. — 335 с.
13. **Виноградов А. П.** Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // *Геохимия*. — 1962. — № 7. — С. 555–571.
14. **ООО “Расписание погоды”.** Электронная версия. URL: <https://rp5.ru>. Дата обращения 03.07.2022.
15. **ГОСТ 17.4.1.02-83.** Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения. — М.: Госстандарт, 1983.
16. **Еделев А. В., Юркевич Н. В., Гуреев В. Н., Мазов Н. А.** Проблемы рекультивации складированных отходов горнорудной промышленности в Российской Федерации // *ФТПРПИ*. — 2022. — № 6. — С. 168–186.

Поступила в редакцию 02/IX 2022

После доработки 27/II 2023

Принята к публикации 16/III 2023