

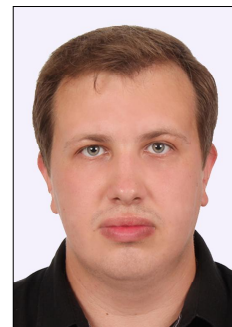
УДК 622.17, 550.84, 632.15
DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-3-21-27

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РИСКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОРОДНЫХ ОТВАЛОВ С ФАКТОРАМИ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

MODELS AND METHODS OF GEOCHEMICAL ASSESSMENT OF THE RISK OF ROCK DUMPS INTERACTION WITH ENVIRONMENTAL FACTORS

И. А. Пшеничный, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Институт информационных технологий и компьютерных наук, г. Москва
s160501@edu.misis.ru

I. Pshenichny, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "National
Research Technological University "MISIS", Institute of Information Technology and Computer Science,
Moscow



Рассмотрены модели и методы геохимического тестирования и оценки влияния породных отвалов на факторы внешней среды. *Объектом* тестирования являлись пробы руд и пород в хвостохранилище, образованные при добыче порфиристо-медных руд открытым способом. *Целью* тестирования является оценка риска взаимодействия породных отвалов с факторами внешней среды, определение содержания вредных веществ в пыли, а также формирование дренажа кислых пород и выщелачиваемых металлов. *Задачей* тестирования является анализ среднего содержания серы и сульфида серы в отваловых породах и рудах, анализ кислотно-нейтрализующего потенциала в данных породах и потенциала нейтрализации кислоты, а также оценка риска взаимодействия породных отвалов с факторами внешней среды. По результатам показателей учета кислотных оснований, характеризующих количество кислото-продуцирующих (сульфидов) и кислото-нейтрализующих (карбонатов) минералов, а также их соотношения, выполнялась ускоренная прогнозная оценка риска образования кислых дренажных и шахтных вод. При помощи геохимического тестирования проб горных пород и отвалов определены содержания серы, сульфида серы, кислотно-нейтрализующего потенциала и потенциала нейтрализации кислоты. При помощи геохимического тестирования пород и руд проведена оценка влияния породных отвалов на внешнюю среду, определено содержание вредных веществ в пыли и влияние порфиристо-медных руд на формирование дренажных кислых пород и выщелачиваемых металлов. Полученные данные позволили определить уровень насыщения водотоков кислотными продуктами, наносящими вред внешней среде. На основании результатов геохимических тестов предложены варианты расположения породных отвалов и строительства горно-добывающих и перерабатывающих производств при разработке месторождения

Ключевые слова: хвостохранилище, геохимическое тестирование, породные отвалы, факторы внешней среды, токсичные микроэлементы, выщелачивание, порода, руда, сера, дренаж кислых пород

Models and methods of geochemical testing and evaluation of the influence of rock dumps on environmental factors are considered. *The object of testing* are samples of ores and rocks in the tailings dump formed during the extraction of porphyry-copper ores by an open method. *The purpose of testing* is to assess the risk of rock dumps' interaction with environmental factors, to determine the content of harmful substances in dust, as well as the formation of drainage of acidic rocks and leached metals. *The task of testing* is to analyze the average content of sulfur and sulfur sulfide in dump rocks and ores, to analyze the acid-neutralizing potential in these rocks and the potential for acid neutralization, as well as to assess the risk of rock dumps' interaction with environmental factors. Based on the acid base accounting indicators, characterizing the amount of acid-producing (sulfides) and acid-neutralizing (carbonates) minerals, as well as their ratios, an accelerated predictive assessment of the risk of acid drainage and mine water formation has been performed. With the help of geochemical testing of rock samples and dumps, the contents of sulfur, sulfur sulfide, acid-neutralizing potential and acid neutralization

potential are determined. With the help of geochemical testing of rocks and ores, the impact of rock dumps on the external environment has been assessed, the content of harmful substances in dust and the influence of porphyry-copper ores on the formation of acidic drainage rocks and leached metals are determined. The data obtained made it possible to determine the level of saturation of watercourses with acidic products harmful to environmental factors. Based on the results of geochemical tests, options for the location of rock dumps and the construction of mining and processing industries during the development of the deposit are proposed

Key words: *tailings storage, geochemical testing, rock dumps, environmental factors, toxic trace elements, leaching, rock, ore, sulfur, drainage of acidic rocks*

Введение. Ухудшение экологической обстановки часто связано с повышением концентрации металлов на территории добычи и переработки полезных ископаемых в почве и воде [14]. Самыми существенными в этом отношении являются процессы окисления и растворения сульфидов, приводящие к возникновению хорошо растворимых в воде сульфатов. Высвобождение элементов, в том числе и токсичных, при окислении сульфидов и их миграции в подземные воды может приводить к широкому рассеиванию компонентов с последующей концентрацией их в различных объектах окружающей среды. Кроме того, наблюдается рост содержания рудных элементов в почвах и растениях. Растения можно сравнивать с мощными насосами, которые перекачивают минерализованные растворы на поверхность, а отмирание зеленой массы растений приводит к повторному и часто более сильному загрязнению тяжёлыми металлами поверхностного слоя почвы, а ее сжигание – к загрязнению атмосферы. При разработке месторождений карьерами происходит значительное нарушение поверхности, а в местах отработки появляются большие отвалы. Использование технических ресурсов для строительных целей и дорожных покрытий также может привести к ухудшению экологической обстановки, которая способна проявиться через значительное время. Этим проблемам уделяется достаточно большое внимание. Раньше при оценке технико-экономических показателей эффективности обработки месторождений учитывали прежде всего количество и качество руды, а в настоящее время предусматривают еще и экологические последствия разработки месторождения и планируют затраты на охрану окружающей среды. Эти затраты могут быть настолько большими, что эксплуатация месторождений, даже достаточно крупных и богатых, оказывается порой нерентабельной [10].

В современных условиях актуален вопрос защиты факторов внешней среды. Уделяется недостаточное внимание проблеме отходов, влияющих на внешнюю среду при добыче полезных ископаемых. Чаще всего результатами таких мероприятий является большое количество скоплений различной породы и шлаков на земной поверхности, которые по объёмам могут существенно превышать количество добытых полезных ископаемых. Пыль, которая сдувается ветром с поверхности породных отвалов, насыщена химическими соединениями и влечет за собой загрязнение прилегающих территорий токсичными микроэлементами, а атмосферные осадки переносят их в водную среду [5; 8; 15]. Для предотвращения подобных явлений перед началом работ по добыче полезных ископаемых необходимо проводить геохимические тесты для определения состава руд и пород [11]. В этой связи вопросы геохимического тестирования являются актуальной научно-технической задачей.

Материалы и методы. Для прогнозной оценки влияния породных отвалов на внешнюю среду проводилось геохимическое тестирование пород и руд с целью определения вредно-содержащихся веществ в пыли, а именно – для оценки риска формирования дренажных кислых пород и выщелачиваемых металлов.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

- 1) выполнить анализ среднего содержания серы и сульфида серы в отвальных породах и рудах;
- 2) провести анализ кислотно-нейтрализующего потенциала в данных породах и потенциала нейтрализации кислоты;
- 3) оценить риск воздействия породных отвалов на внешнюю среду.

Для получения достоверных данных необходимо исследовать состав пород и руд с целью определения вредных веществ, со-

держаться в пыли. Исследуемые образцы руд относят к порфирово-медному типу. Содержание сульфидов низкое (менее 1 % общей серы). Основными породообразующими минералами являются полевой шпат, кварц, слюда и серицит. Запасы состоят примерно из 80 % сульфидной руды и 20 % оксидной руды. Сульфидная руда представлена в основном халькопиритом и борнитом, а оксидная – в основном малахитом и азуритом. К числу сульфидных минералов относятся энаргит, блеклые руды и арсенопирит. Все эти минералы содержат мышьяк и сурьму, которые могут загрязнять промышленные концентраты [6].

Формирование кислых стоков и/или выщелачивание металлов при взаимодействиях породных отвалов, хвостов обогащения и забалансовых руд с атмосферными осадками характерно для разработки сульфидных месторождений во всех климатических зонах. Окисление сульфидных минералов при взаимодействии с кислородом воздуха и атмосферными осадками может приводить к образованию сульфатов, повышению кислотности дренажных вод и их выщелачивающих способностей по отношению к металлам [2; 9; 12]. Обязательным требованием по оценке воздействия горно-добывающей промышленности на окружающую среду является оценка риска образования дренажа кислых пород и выщелачивания металлов, позволяющая оптимизировать вопросы проектирования и размещения участков породных отвалов, хвостов обогащения, сбросов карьерных вод и т. д. [13]. При наличии существенных рисков формирования дренажа кислых пород и выщелачивания металлов предприятие обязано разработать план управления кислото-продуцирующими отходами и карьерными водами с целью минимизировать воздействия на окружающую среду [7]. Одним из основных механизмов управления дренажем кислых пород и выщелачивания металлов является проектирование породных отвалов и размещение хвостов обогащения с учетом прогноза образования дренажных кислых пород и выщелачивания металлов. Одним из методов предотвращения рисков является формирование породных отвалов с использованием карбонатных пород (прослойка или смешивание), нейтрализующих образующиеся кислотные воды и снижающие риск выщелачивания токсичных элементов.

Выщелачивание токсичных элементов может происходить и в нейтральных или слабощелочных условиях, что также должно быть учтено при формировании дренажа кислых пород и выщелачиваемых металлов.

Для формирования дренажа кислых пород и выщелачиваемых металлов необходимо как можно раньше выполнять комплекс ускоренных специальных геохимических тестов руд и пород по кислотно-щелочному балансу, а также производить оценку риска формирования дренажных кислых пород и выщелачиваемых металлов для всех типов горной массы, которые будут извлечены, нарушены или переработаны на обогатительных фабриках [1]. В дальнейшем при необходимости выполняются длительные (несколько месяцев) кинетические тесты во влажных камерах, моделирующие поведение руд и пород в природных условиях.

Для горно-добывающих предприятий рекомендуется проводить как статическое, так и кинетическое тестирование на постоянной основе по мере расширения геолого-разведочных работ или ввода в эксплуатацию новых участков месторождений [4].

Специальные ускоренные и длительные кинетические тесты выполняются по международно-признанным методикам для сопоставимости получаемых результатов и сравнения их с результатами для аналогичных месторождений.

Ускоренная прогнозная оценка риска образования кислых дренажных и шахтных вод выполняется по показателям учета кислотных оснований, характеризующих количество кислото-продуцирующих (сульфидов) и кислото-нейтрализующих (карбонатов) минералов, а также их соотношением [3].

Для оценки прогноза образования кислых дренажных вод и выщелачивания токсичных элементов проведено геохимическое тестирование руд и пород.

По составу руд выделено три типа: окисленные, переходные (смешанные) и сульфидные руды примерно в соотношении 30, 10 и 60 % соответственно, с учетом их геологического распространения.

Статистические геохимические тесты по оценке дренажа состоят из следующих показателей:

- 1) сульфид-серы (%S⁻²) (рис. а);
- 2) общая сера (%S) (рис. б);

3) коэффициент потенциала нейтрализации находится по следующей формуле (1):

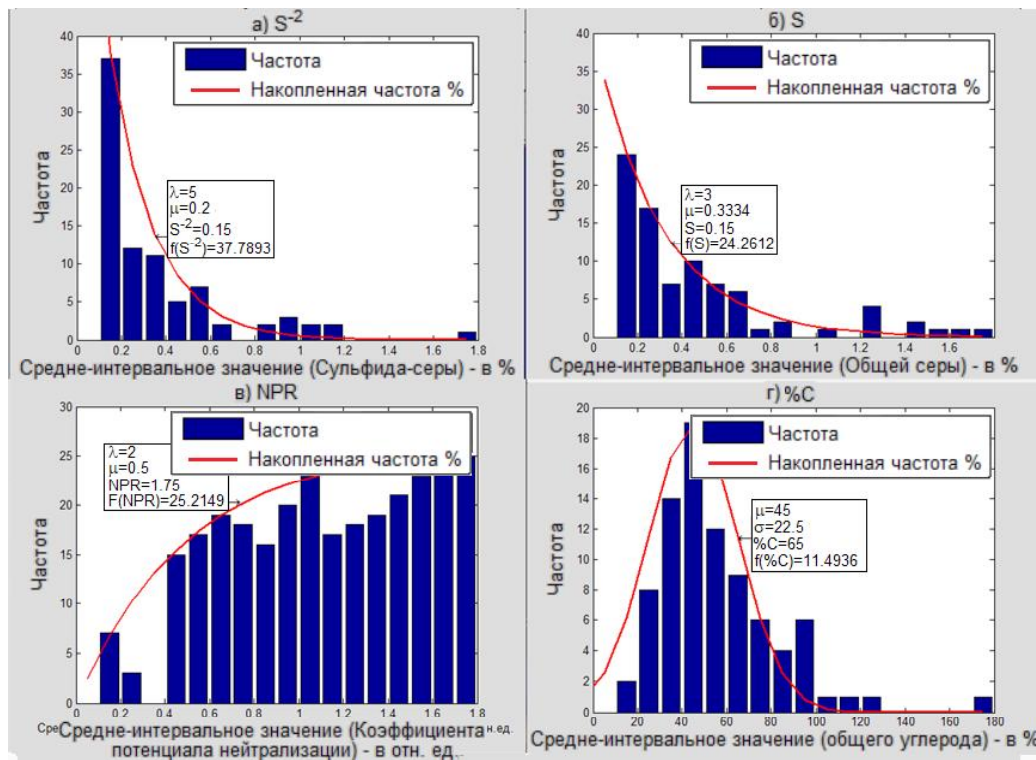
$$NPR = ANP/AGP, \quad (1)$$

где NPR – коэффициент потенциала нейтрализации;

ANP – потенциал нейтрализации кислоты;
 AGP – потенциал образования кислоты (рис. в).

Чем выше это соотношение, тем ниже риски образования дренажа кислых пород;

4) общий углерод (% C) (рис. г).



Распределение значений показателя потенциала нейтрализации кислоты для образцов отвальных пород (λ – параметр распределения, σ – среднеквадратичное отклонение, μ – математическое ожидание и параметр масштаба, $f(x)$ – функция вероятности/распределения) / Distribution of values of the acid neutralization potential indicator for samples of dump rocks (λ is the distribution parameter, σ is the standard deviation, μ is the expectation and scale parameter, $f(x)$ is the probability/distribution function)

Результаты расчетов данных, приведенные на рисунке, показывают, что исследованные образцы пустой породы относятся в основном к категории не формирующих кислотные дренажные стоки и вероятность образования таких стоков низкая.

Вследствие низкой вероятности формирования кислых дренажных стоков возможен слабый вынос химических микроэлементов из пустой породы. Концентрация таких элементов стабильна и постепенно уменьшается с течением времени.

Таким образом, по итогам статистических тестов можно определить, что риск воздействия породных отвалов на окружающую среду очень низок, однако статическое тестирование не всегда позволяет получить на-

дежную оценку кислотообразующих свойств пустой породы.

Нахождение кислотообразующих свойств при помощи расчетов приводит к завышению показателей за счет сульфидной серы некислотообразующих минералов. Кроме того, в окружающей среде отсутствуют жесткие условия для окисления пустой породы, способные за небольшой промежуток времени вызвать полноценное окисление сульфидных минералов. В связи с этим использование расчетов при оценке формирования дренажа приводит к завышению возможности формирования кислотных дренажных вод и стоков при складировании пустой породы в хвостохранилище.

Корректность применения расчетных значений подтверждается кинетическим тестированием за значительный промежуток времени, в процессе которого не произошло формирования кислых стоков. Для точной прогнозной оценки развития появления кислотных дренажных вод и стоков необходимо применять не только методы геохимического тестирования, но и методы прямого анализа, позволяющие изучить минеральный состав сульфидных минералов, а также их соотношения.

Заключение. Добыча полезных ископаемых вызывает ряд негативных факторов, влияющих на внешнюю среду, таких как пылеобразование, загрязнение почвы и водных массивов. В ходе выполненных исследований определено наличие в образцах из породных отвалов кислотно-основного и выщелачивающего потенциала руд и пород: нейтрально-образующие кислоты, необразующие кислоты и образующие кислоты. Эти данные требуют обязательного учета, так как могут привести к насыщению сопутствующих водотоков окисленными продуктами и будут иметь насыщенный голубой цвет. Об-

разование таких водотоков с голубой водой является подтверждением риска образования дренажных вод с содержанием токсичных элементов. Образование голубой воды в техногенных водотоках является результатом воздействия внешних факторов окружающей среды на горные породы, засоленные медным купоросом в зоне окисления рудных сульфидов. В процессе окисления сульфидных руд кислородом воздуха, поступающего в основном с атмосферными осадками, происходит обогащение подземных вод продуктами окисления, главным образом, сульфатами рудных металлов. Проведенное геохимическое тестирование по определению кислотообразующего и выщелачиваемого потенциала пород и руд, показало, что большинство образцов относятся к категории неокисляющих. Однако часть проб все же относится к кислотообразующим и для снижения рисков образования и воздействия дренажных вод на внешнюю и окружающую среду рекомендуется учитывать указанные факторы при планировании проектных работ по разработке месторождений.

Список литературы

1. Глазырина М. А., Фурманова В. В. Методы и оценка геохимических исследований Новороссийского района // Молодёжный вестник Новороссийского филиала Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2021. Т. 1. № 1. С. 13–19.
2. Джартаева И. Б., Масакбаева С. Р. Исследование факторов влияющих на процесс кучного выщелачивания медных руд // Polish Journal of Science. 2021. № 40. С. 13–16.
3. Зверева В. П., Фролов К. Р., Лысенко А. И. Химические реакции и условия минералообразования на хвостохранилищах Дальнего Востока России // Горные науки и технологии. 2021. Т. 6. № 3. С. 181–191.
4. Иванова О. И., Колпакова О. П., Мамонтова С. А., Ковалева Ю. П. Оценка рационального использования природных ресурсов при открытых горных работах // Вестник КрасГАУ. 2020. № 3. С. 11–19.
5. Игнатенко О. В., Носкова Н. В. Оценка воздействия золотодобывающего предприятия на атмосферный воздух // Труды Братского государственного университета. Серия «Естественные и инженерные науки». 2020. Т. 1. С. 254–259.
6. Лиманцева О. А., Рыженко Б. Н. Оценка факторов механизма формирования дренажных вод различных технологических типов руд месторождений медистых песчаников термодинамическим моделированием системы «вода – порода – газ» // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: сб. материалов Четвёртой Всерос. науч. конф. с междунар. участием (г. Улан-Удэ, 17–20 августа 2020 г.) / Геологический институт СО РАН. Улан-Удэ: Бурят. науч. центр Сиб. отд-ния РАН, 2020. С. 394–397.
7. Лиманцева О. А., Рыженко Б. Н., Черкасова Е. В. Проявления кислотного дренажа на месторождении Павловское (Новая Земля) // Геохимия. 2019. Т. 64, № 5. С. 538–547.
8. Макаров Д. В., Кониная О. Т., Горячев А. А. Методы снижения пыления отвалов горнопромышленных отходов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2021. № 4. С. 160–170.
9. Плохов А. С., Харько П. А., Пашкевич М. А. Исследование влияния хвостового хозяйства медно-колчеданного месторождения на поверхностные воды // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 4. С. 57–68.
10. Светлов А. В., Красавцева Е. А., Горячев А. А., Поторочин Е. О. Проблема переработки бедных руд и техногенных отходов, снижение негативного влияния на окружающую среду от деятельности предприятий горнопромышленного комплекса // Вестник Кольского научного центра РАН. 2020. Т. 12, № 3. С. 21–34.

11. Стась Г. В., Калаева С. З., Муратова К. М., Чистяков Я. В. К вопросу защиты окружающей среды от мелкодисперсной пыли горных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. № 1. С. 92–109.

12. Таскина Л. В. Геохимия рудных элементов в шахтных водах Новоширокинского месторождения и их роль в загрязнении окружающей среды // Вестник Забайкальского государственного университета. 2020. Т. 26, № 6. С. 34–42.

13. Филатова О. Р. Проблемы прогноза развития кислотного дренажа при освоении сульфидсодержащих месторождений (на примере Чукотки) // Новое в познании процессов рудообразования: Труды молодых учёных, посвящённые 90-летию ИГЕМ РАН. М.: Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, 2020. С. 148–151.

14. Krupskaya L. T., Bubnova M. B., Golubev D. A. An innovative solution to the problem of reclamation of the dusting surface of the tailings of a closed mining enterprise in the Primorsky territory // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Irkutsk Region, September 16–20, 2019). Irkutsk Region: IOP Publishing Ltd, 2020. P. 12–56.

15. Murzin M. A., Gorlenko N. V. Analyzing effects of dust from mining enterprises on the environment // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Krasnoyarsk, September 16–20, 2019) / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall. Krasnoyarsk, Russian Federation: IOP Publishing Ltd, 2021. P. 42–91.

References

1. Glazyrina M. A., Furmanova V. V. *Molodozhny vestnik Novorossiyskogo filiála Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V. G. Shuhova* (Youth Bulletin of the Novorossiysk Branch of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov), 2021, vol. 1, no. 1, pp. 13–19.

2. Dzhartayeva I. B., Masakbayeva S. R. *Polish Journal of Science* (Polish Journal of Science), 2021, no. 40, pp. 13–16.

3. Zvereva V. P., Frolov K. R., Lysenko A. I. *Gornye nauki i tehnologii* (Mining sciences and technologies), 2021, vol. 6, no. 3, pp. 181–191.

4. Ivanova O. I., Kolpakova O. P., Mamontova S. A., Kovaleva Yu. P. *Vestnik KrasGAU* (Bulletin of the KrasSAU), 2020, no. 3, pp. 11–19.

5. Ignatenko O. V., Noskova N. V. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Yestestvennye i inzhenernye nauki* (Proceedings of the Bratsk State University. Series “Natural and engineering sciences”), 2020, vol. 1, pp. 254–259.

6. Limantseva O. A., Ryzhenko B. N. *Geologicheskaya evolyutsiya vzaimodeystviya vody s gornymi porodami: sb. materialov Chetvortoy Vseros. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiyem (g. Ulan-Ude, 17–20 Avgusta 2020 g.)* (Geological evolution of the interaction of water with rocks: Sat. materials of the Fourth All-Russian. scientific conf. with international participation (Ulan-Ude, dated by August 17–20, 2020) / Geological Institute SB RAS). Ulan-Ude: Buryat. scientific center of Sib. Department of the Russian Academy of Sciences, 2020, pp. 394–397.

7. Limantseva O. A., Ryzhenko B. N., Cherkasova Ye. V. *Geohimiya* (Geochemistry), 2019, vol. 64, no. 5, pp. 538–547.

8. Makarov D. V., Konina O. T., Goryachev A. A. *Fiziko-tehnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh* (Physical and technical problems of mining), 2021, no. 4, pp. 160–170.

9. Plokhov A. S., Kharko P. A., Pashkevich M. A. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten* (Mining information and analytical bulletin), 2021, no. 4, p. 57–68.

10. Svetlov A. V., Krasavtseva Ye. A., Goryachev A. A., Potorochin Ye. O. *Vestnik Kolskogo nauchnogo tsentra RAN* (Bulletin of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2020. vol. 12, no. 3, pp. 21–34.

11. Stas G. V., Kalayeva S. Z., Muratova K. M., Chistyakov Ya. V. *Izvestiya Tulsckogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle* (Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences), 2019, no. 1, pp. 92–109.

12. Taskina L. V. *Vestnik Zabaykalskogo gosudarstvennogo universiteta* (Transbaikal State University Journal), 2020, vol. 26, no. 6. P. 34–42.

13. Filatova O. R. *Novoye v poznanii protsessov rudoobrazovaniya: Trudy molodykh uchonykh, posvyashchennyye 90-letiyu IGEM RAN* (New in the knowledge of ore formation processes: Works of young scientists dedicated to the 90th anniversary of IGEM RAS). M.: Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, 2020, pp. 148–151.

14. Krupskaya L. T., Bubnova M. B., Golubev D. A. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (IOP Conference Series: Earth and Environmental Science) (Irkutsk Region, September 16–20, 2019). Irkutsk Region: IOP Publishing Ltd, 2020. P. 12–56.

15. Murzin M. A., Gorlenko N. V. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Krasnoyarsk, September 16–20, 2019) / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall). Krasnoyarsk, Russian Federation: IOP Publishing Ltd, 2021, pp. 42–91.

Информация об авторе**Information about the author**

Пшеничный Илья Алексеевич, аспирант, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Институт информационных технологий и компьютерных наук, г. Москва, Россия. Область научных интересов: экологические проблемы горного производства факторами внешней среды: геохимическое тестирование, оценка рисков s160501@edu.misis.ru

Ilya Pshenichny, postgraduate, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "National Research Technological University "MISIS", Institute of Information Technology and Computer Science, Moscow Russia. Research interests: environmental problems of mining production by environmental factors: geochemical testing, risk assessment

Для цитирования

Пшеничный И. А. Модели и методы геохимической оценки риска взаимодействия породных отвалов с факторами внешней среды // Вестник Забайкальского государственного университета. 2022. Т. 28, № 3. С. 21–27. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-3-21-27.

Pshenichny I. Models and methods of geochemical assessment of the risk of interaction of rock dumps with environmental factors // Transbaikal State University Journal, 2022, vol. 28, no. 3, pp. 21–27. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-3-21-27.

Статья поступила в редакцию: 16.03.2022 г.

Статья принята к публикации: 25.03.2022 г.