

АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ СЕРЫ И ЖЕЛЕЗА НА ПРИМЕРЕ НАМЫВНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ МАССИВОВ

В.В. Ческидов¹, Н.Н. Барабанов^{1,2}, М.О. Ложкин¹, П.А. Смирнов^{1,3}, А.А. Лагутина¹

¹ ГИ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: m1605561@edu.misis.ru

² GeoSolutions, Москва, Россия

³ ОАО «Орика СиАйЭс», Москва, Россия

Аннотация: В условиях постоянного усложняющихся горно-геологических условий добычи полезных ископаемых, а также их дефицита человечество вынуждено искать новые источники минерального сырья. Несмотря на то, что все чаще обсуждается вопрос освоения залежей на дне Мирового океана или месторождений, расположенных на территориях с экстремальными климатическими условиями, вовлечение в промышленную переработку накопившихся горнопромышленных отходов является наиболее вероятным способом расширения ресурсной базы многих стран в ближайшие годы. Кроме непосредственного получения полезных компонентов, переработка отходов позволит в ряде случаев значительно улучшить экологическую обстановку в горно-металлургических регионах. В России основными факторами, сдерживающими вовлечение горнопромышленных отходов в переработку, на сегодняшний день являются: недостаточность проработанная нормативно-правовая база, отсутствие достоверной и полной информации о количестве, составе, свойствах накопленных и образующихся отходов, отсутствие специализированных методов изучения техногенных массивов. Они имеют ряд особенностей, которые необходимо учитывать при проведении геохимических исследований, оценке качественных и количественных показателей потенциального минерального сырья. Учет пространственной изменчивости свойств техногенных отложений, в первую очередь, намывных, а также применение современных методов геостатистики и компьютерных технологий позволят значительно снизить объемы необходимых исследований, создавать модели отвалов, хвостохранилищ и других накопителей отходов, отвечающих современным требованиям, а следовательно, снизить общие затраты на изучение. Отходы переработки минерального сырья (хвосты, шлаки и др.) являются наиболее перспективными для вовлечения в переработку. Построенные модели хранилища кека и оценка закономерностей распределения магнетита, пирита и серы показывают, что при намыве несмотря на дифференциацию вещества, вызванную процессами гравитационного фракционирования, некоторые соединения благодаря выбранной технологии формирования, крупности слагающих их частиц достаточно равномерно распределены по массиву. Однако минералы, имеющие большие значения удельного веса (например, сульфиды меди и свинца) образуют скопления в непосредственной близости от мест выпуска пульпы. Выявленные закономерности позволят повысить качество районирования техногенных массивов в соответствии с химическим составом отложений и в последствии выделить участки отложений, которые наиболее перспективны для вовлечения в переработку. На этапах непосредственного освоения массива эти закономерности обеспечат выбор оптимальной последовательности отработки блоков, а также будут способствовать разработке мероприятий по управлению качественными характеристиками минерального сырья, поступающего на соответствующие стадии переделов.

© В.В. Ческидов, Н.Н. Барабанов, М.О. Ложкин, П.А. Смирнов, А.А. Лагутина. 2021.

Ключевые слова: горное дело, техногенный массив, горнопромышленные отходы, геостатистика, переработка отходов, намывной массив, метод обратных взвешенных расстояний, сульфиды, хвостохранилище.

Для цитирования: Ческидов В. В., Барабанов Н. Н., Ложкин М. О., Смирнов П. А., Лагутина А. А. Анализ закономерностей распределения соединений серы и железа на примере намывных техногенных массивов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 3. – С. 142–153. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-3-0-142-153.

Distribution of iron and sulfur compounds: A case study of hydraulic waste fills

V.V. Cheskidov¹, N.N. Barabanov^{1,2}, M.O. Lozhkin¹, P.A. Smirnov^{1,3}, A.A. Lagutina¹

¹ Mining Institute, National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia,
e-mail: m1605561@edu.misis.ru

² GeoSolutions, Moscow, Russia

³ Orica CIS JSC Moscow, Russia

Abstract: In view of increasingly difficult geological conditions of mining and due to shortage of mineral resources, the man has to find new sources of minerals. In the face of the growing interest in the deep sea mining and development of deposits in the areas of extreme weather, the most promising method to replenish mineral reserves and resources in many countries in the years to come is commercial-level processing of huge mining waste accumulations. Alongside with production of useful components, waste treatment can largely improve the environmental situation in mining and metallurgical regions. In Russia the major constraints of mining waste management are: inefficient regulatory and legal framework, lack of reliable information of the amount, composition and properties of waste, as well as the absence of special investigation methods for mining waste accumulation. Mining and processing waste has some peculiarities which should be taken into account in geochemical analysis, or in estimation of qualitative and quantitative figures on potential mineral raw material. Inclusion of the spatial variability in properties of waste accumulations, in the first turn, hydraulic fills, as well as the use of advance techniques of geostatistics and computer technologies considerably reduces the content of the required analyses, enables modeling of dumps, tailings ponds and other waste accumulations in compliance with the modern standards, and, consequently, allows cutting of total expenses connected with the research. Mineral processing waste (tailings, slag, etc.) are the most promising in terms of recycling. The models of agglomerated cake storage and the estimate of distributions of magnetite, pyrite and sulfur show that in hydraulic filling, despite segregation of materials due to sizing by gravity, some compounds are sufficiently uniformly distributed in a fill owing to the selected technology for formation of particle sizes. At the same time, minerals with high specific density (for example, copper and lead sulfides) tend to accumulating at the pulp slurry outlets. The revealed distribution patterns can improve quality of zoning of waste accumulations in accordance with their chemical composition and, thus, can help detect pockets which are most promising in terms of processing. At the stages of waste processing, these distribution patterns can ensure selection of an optimal processing sequence, and also will contribute to the efficient control over characteristics of mineral feed at all process stages.

Key words: mining, fills and dumps, mining waste, geostatistics, waste processing, hydraulic fill, weighted distance discriminant approach, sulfides, tailings pond.

For citation: Cheskidov V. V., Barabanov N. N., Lozhkin M. O., Smirnov P. A., Lagutina A. A. Distribution of iron and sulfur compounds: A case study of hydraulic waste fills. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(3):142-153. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-3-0-142-153.

Введение

В результате добычи полезных ископаемых на территории Российской Федерации на сегодняшний день накоплен большой объем отходов, которые весьма разнообразны по своему минералогическому, химическому составу, физическим свойствам и другим показателям. По разным оценкам общий накопленный объем отходов, образовавшихся в результате добычи и переработки полезных ископаемых, на территории России приближается к значению в 100 млрд т (с ежегодным приростом от 1,5 до 2 млрд т).

Большую часть образующихся горнопромышленных отходов составляют вскрышные породы, при этом нужно отметить, что потенциал их использования остается крайне низким. Особенно это касается глинистых четвертичных отложений, а также осадочных пород, которые при контакте с влагой в поверхностных условиях быстро разрушаются. К таким литологическим разностям относятся песчаники на глинистом цементе, алевролиты, которые перемещаются в многочисленные отвалы при добыче каменного и бурого углей [1].

Несколько другая структура образующихся отходов формируется при разработке рудных месторождений полезных ископаемых. В данном случае помимо вскрышных пород образуются отходы на различных стадиях переделов, начиная от процесса обогащения и заканчивая выплавкой металла. При этом в процессе непосредственной добычи формируемые отходы (вскрыша), как правило, они имеют большой потенциал для использования. Скальные горные породы после дробления могут использоваться в строительстве в качестве щебня, карбонатные породы в цементной, строительной, химической и других отраслях. Однако еще больший интерес для сегодняшней промышленности представляют отходы переделов

минерального сырья: хвосты, кеки, шлаки и др.

В связи с несовершенством технологий или ввиду отсутствия спроса на конкретные промышленные продукты переработки комплексных руд в горнопромышленных отходах накапливается достаточно большой объем полезных компонентов, извлечение которых может быть экономически целесообразным при внедрении новых технологий или изменении конъюнктуры рынка металлов или минерального сырья в целом. Среди примеров можно привести ситуацию с редкоземельными металлами, которые долгое время не рассматривались в качестве попутных компонентов на многих месторождениях России и других стран. Однако в последнее двадцатилетие в связи с развитием наукоемких отраслей (электроники, материаловедения, энергетики и др.) спрос практически на все редкие и редкоземельные металлы вырос в несколько раз [2].

В России на сегодняшний день отсутствует проработанная система учета накопленных и формируемых горнопромышленных отходов, несмотря на наличие федеральных и региональных программ. Из-за отсутствия информации, а также ряда действующих правовых ограничений потенциально пригодные с технологической и экономической стороны массивы отходов остаются невостребованными [3].

Нужно отметить, что 7 марта 2019 г. вышло распоряжение правительства Российской Федерации за номером 365-р «О внесении изменений в Закон Российской Федерации «О недрах» и отдельные законодательные акты Российской Федерации в целях стимулирования использования отходов недропользования». Данный законодательный акт должен уточнить права недропользователей в отношении накопленных и формирующихся горнопромышленных отходов.

Добывающие предприятия смогут извлекать полезные компоненты из отходов, образовавшихся в результате их деятельности. Кроме того, недропользователи получат право использовать отходы для собственных производственных и технологических нужд.

Методы

Немаловажной составляющей вышеупомянутого законопроекта является часть, связанная с предоставлением информации в государственные органы. Наличие актуальных данных позволит повысить инвестиционную привлекательность по переработке горнопромышленных отходов. Нужно отметить, что в ряде случаев складирование и последующее хранение потенциально пригодного минерального сырья в отвалах приводит к снижению его качества или полной утрате. Это связано с процессами выветривания легко разрушаемых минеральных образований при контакте с водой. Среди примеров можно привести окисление сульфидов и последующее их вымывание из массивов, разрушение сподумена и вынос с водными потоками оксида лития. В данном случае нужно отметить, что хранение забалансовых руд или отходов с высоким содержанием полезного компонента приводит к еще большей дестабилизации экологической обстановки в результате загрязнения гидросферы и литосферы [4].

Изменение качественных показателей потенциального техногенного сырья при длительном хранении обуславливает необходимость разработки технологий его использования еще на стадии проектирования добывающих комплексов [5].

Несомненно, в формировании общей политики управления отходами ведущая роль должна быть отдана государству, которое должно стать инициатором по разработке правового обеспечения [6]. С одной стороны, новые законодатель-

ные акты должны упростить процесс вовлечение попутных компонентов, извлечение которых стало целесообразно в результате изменения конъюнктуры рынка, с другой стороны — повысить комплексность переработки минерального сырья. То есть новое правовое обеспечение должно позволить отрасли быть более гибкой, оперативно отвечать на запросы, которые формирует рынок. В свою очередь, комплексность освоения месторождений можно повысить за счет извлечения большего перечня полезных компонентов и повышения их извлечения, но в данном случае обязательной является комплексная оценка финансовых последствий, утрата потенциально востребованного сырья в будущем и т.д. Кроме того, не стоит забывать, что при переработке руд в хвостах обогащения доля неизвлеченных компонентов от их первоначального количества составляет десятки процентов. При переделах медных и никелевых руд потери составляют до 25%, свинцово-цинковых руд — до 45%, вольфрамовых и оловянных руд — до 50–60%. При этом в ряде случаев редкие и редкоземельные металлы, а также нерудные полезные ископаемые, залегающие совместно с основными полезными ископаемыми на месторождениях, не извлекаются совсем [2].

Как уже было указано раньше, одним из сдерживающих факторов развития вовлечения горнопромышленных отходов в промышленные переделы является отсутствие достоверной и полной информации о накопленных и формируемых отходах. И если при соответствующих нормативно-правовых изменениях данные о формируемых сейчас массивах техногенных отложений можно собирать без значительных капитальных вложений, то проблема изучения лежалых хвостов, шламохранилищ и т.д. остается достаточно острой. Химиче-

Усредненное содержание элементов в техногенных отложениях
Averaged content of elements in mining waste

Компонент	Cu	Zn	As	Ba	Pb	Fe _{общ}
Среднее содержание, %	1,26	3,91	0,06	0,15	2,44	22,05
Компонент	S _{общ}	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	
Среднее содержание, %	23,14	0,53	0,43	4,12	0,63	

ское, минералогическое, а затем и технологическое опробование — достаточно дорогостоящие мероприятия, при этом, как и в геологоразведочных работах, сохраняется высокий риск, что по тем или иным количественным или качественным показателям предполагаемое сырье окажется непригодным для переработки. В связи с этим разработка методов изучения техногенных массивов с минимальными финансовыми и временными затратами является важной задачей, которая во многом позволит ускорить процесс вовлечения накопленных и формируемых горнопромышленных отходов в переработку.

Как указано в ряде работ, отложения техногенных массивов имеют более выраженную пространственную изменчивость свойств и характеристик [2, 4, 7]. Это обусловлено, в первую очередь, технологией формирования отвалов, хвостохранилищ и других накопителей. Несомненно, что способ укладки материала в данном случае имеет решающую роль. При отсыпке дифференциация материала по минеральному и гранулометрическому составу происходит менее выражено, при намыве в ряде случаев происходит формирование участков с высоким содержанием того или иного компонента. При этом рассчитать положение такого участка даже при условии наличия исходной информации об укладываемом материале (состав, гидравлическая крупность, скорость намыва и т.д.) достаточно сложно. Существующие модели дают только приблизительную оценку, которая может быть использована

на стадии проектирования мероприятий по изучению массива (разработка сети опробования, выбор методик изучения отложений) [8].

Намывные массивы (хвостохранилища, шламохранилища и др.) представляют наибольший интерес, так как в них накоплены большие объемы измельченного материала, который может содержать высокие концентрации как извлекаемых на предприятии компонентов, так и элементов, которые в используемой технологической цепочке полностью уходят в отходы. В таблице приведено усредненное содержание элементов в автоклавном кеке одного из предприятий, осуществляющих добычу и переработку комплексных медно-цинковых руд.

Хранилище кека представляют собой намывной массив, сброс пульпы осуществлялся с двух точек (с юга и северо-востока). Материал автоклавного кека пластичный, тонкодисперсный, визуально можно выделить два типа по цвету: серо-зеленый и коричневых тонов. При бурении было определено, что структура техногенного массива слоистая, мощность прослоев отложений со схожими свойствами может составлять от нескольких сантиметров до более метра. Максимальная выявленная мощность изучаемого массива составляет 2,05 м. Ложе массива представлено достаточно ровной поверхностью с небольшим понижением абсолютных отметок поверхности в южной части.

Для формирования представительного набора образцов техногенных от-

ложений в соответствии с принципами проектирования сетей инженерно-геологического опробования была разработана система профилей с расположенными на них точками отбора проб. В общей сложности была пробурена 31 скважина диаметром 150 мм с помощью ручного мотобура шнекового типа. Работы осуществлялись в зимний период, в это время формируется слой мерзлого кека, обладающего достаточной несущей способностью, чтобы обеспечить безопасную работу специалистов с использованием необходимого оборудования.

Из каждой пройденной скважины было отобрано по две пробы нарушенной структуры, которые формировались из бурового шлама стандартными методами усреднения. Материал смешивался, затем его укладывали ровным слоем и делили накрест на 4 части (процесс квартования), из них две противоположные удалялись, а две оставшиеся вновь перемешиваются и снова делились на 4 части. Средняя масса одной пробы, отобранной и упакованной в соответствии с требованиями, позволяющими сохранить ее первоначальную влажность, составила около 1 кг. В лабораторных условиях были подготовлены аналитические пробы для изучения вещественного состава автоклавного кека с помощью рентгенофлуоресцентного анализа. Полученные результаты показали, что содержания железа, меди, серы, цинка, свинца в теле массива изменчивы и могут колебаться в значительных пределах [9].

Так как данный массив представляет интерес с точки зрения извлечения из него сульфидов, в первую очередь галенита и сфалерита, а также пирита, в состав его кристаллов входит золото в концентрации, которая может представлять промышленный интерес. Для изучения закономерностей распределения

перечисленных компонентов и подсчета общих запасов было выбран комплекс геостатистических методов, геометрическое моделирование осуществлялось на принципах построения блочного моделирования [10].

Результаты

В программном комплексе Micromine была построена модель изучаемого накопителя (рис. 1) методом обратных взвешенных расстояний (IDW-метод). В каждом выделенном блоке (размер определен экспертным путем) была проведена оценка содержания общей серы, пирита и магнетита. Последний минерал был выбран, так как рассматривалась возможность его попутного выделения в отдельный продукт, а также с целью анализа закономерностей распределения железа в различных соединениях.

С помощью метода кросс-валидации был выбран показатель степени, который использовался при вычислении весов (w) в IDW-методе:

$$W_i = \frac{1}{S \cdot h_i^\beta},$$

где h_i — расстояние от искомой точки до известной, которое в двумерном случае вычисляем из соотношения:

$$h_i = \sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2},$$

x_i и y_i — координаты точки, в которой проводился отбор проб для дальнейших аналитических исследований; x_k и y_k — координаты рассматриваемой точки; β — степенной показатель при вычислении весов; S — сумма всех расстояний от рассматриваемой точки до точек замера параметров, возведенных в степень β .

Расчеты с помощью метода кросс-валидации были произведены в разработанной авторами программе. При этом на каждом этапе из генеральной

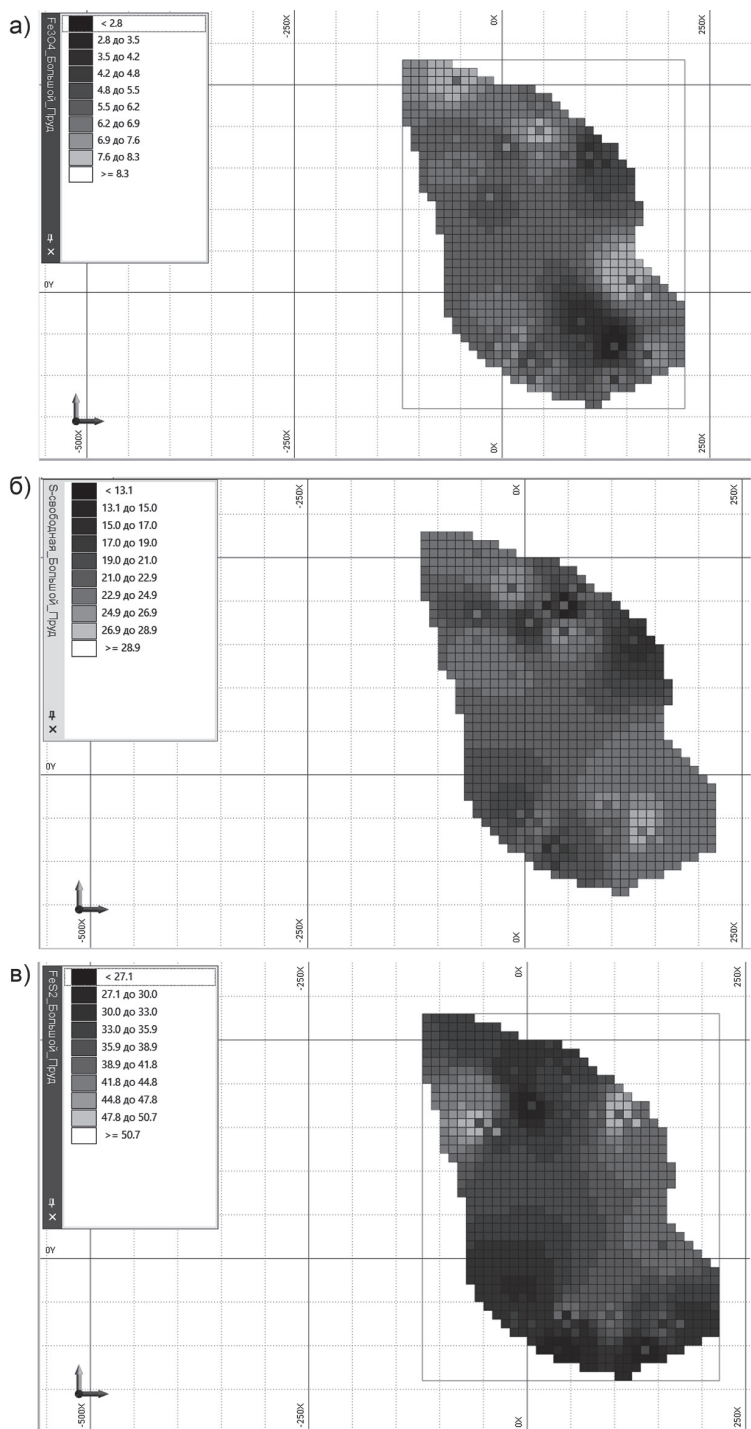


Рис. 1. Распределение компонентов в теле массива: магнетита (а); серы (б); пирита (в)
 Fig. 1. Distribution of components in waste body: magnetite (a); sulfur (b); pyrite (c)

выборки удалялась 1 точка, после чего значение в ней предсказывалось с помощью метода обратных взвешенных расстояний на основании оставшихся элементов. Ошибка оценивалась как сумма квадратов разностей между предсказанными и истинными значениями. Были использованы значения β в интервале от 0,5 до 5. Наименьшая ошибка была получена для всех выборок при значении $\beta = 2$. Во многом это обусловлено тем, что границы между участками с низкими и высокими содержаниями рассматриваемых компонентов плавные [11].

Проведенное моделирование и последующий анализ результатов показал, что коэффициент вариации для всех трех получившихся выборок (каждый расчетный блок считаем отдельным элементом

выборки) не превышает значения 16%. Такое низкое значение обусловлено условиями формирования массива (за счет гидравлической укладки кека) и формированием массива с двух точек, что в значительной мере приводит к усреднению отложений. Однако в то же время, в рамках массива можно выделить зоны с высокими концентрациями серы (участки скопления сульфидов), пирита и магнетита.

Как видно из рис. 1, вблизи северо-восточного выпуска сформировалась зона с высоким содержанием пирита и относительно низкой концентрацией магнетита. В то же время, у южного выпуска концентрация обоих минералов минимальна для рассматриваемых выборок [12].

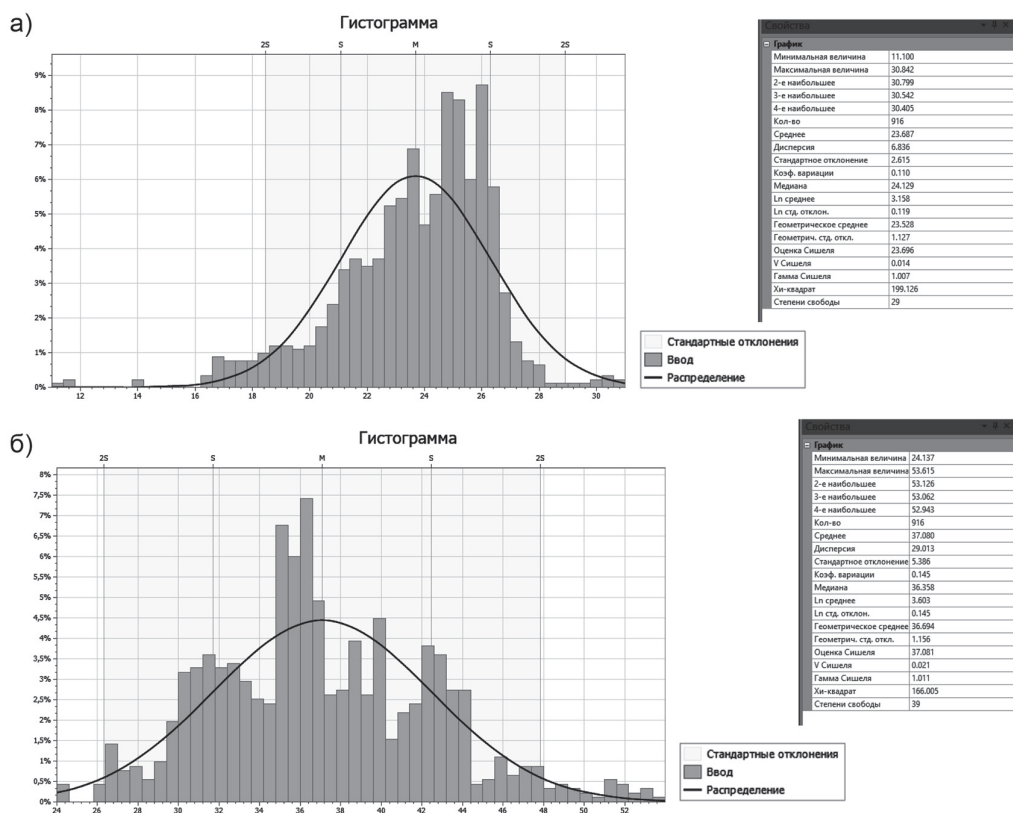


Рис. 2. Распределение компонентов по блокам в теле техногенного массива: сера (а); пирит (б)

Fig. 2. Distribution of components per blocks of waste body: sulfur (a); pyrite (b)

Кривая содержаний и тоннажа (Большой пруд - РФА.DAT)
FeS₂

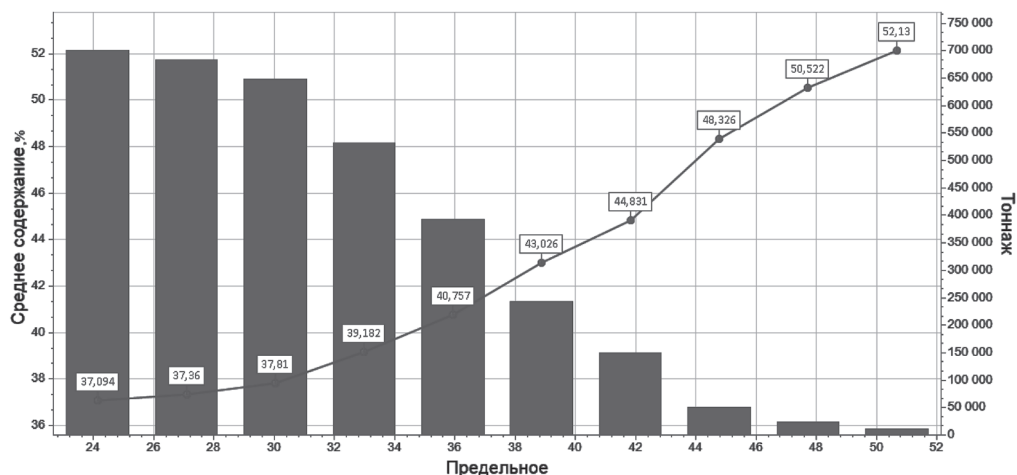


Рис. 3. Тоннаж отложений с различным содержанием пирита: кривая показывает среднее содержание при различных минимальных (предельных) содержаниях, высота столбика гистограммы демонстрирует тоннаж отложений с данным средним содержанием

Fig. 3. Tonnage of waste with different pyrite content: the curve shows averaged content at different minimal (limiting) contents; the height of a histogram bar means the tonnage of waste with this average content

Распределение в массиве серы во многом коррелирует с распределением пирита, однако наибольший интерес представляют участки, в которых высокое содержание серы и низкое пирита, это зоны скопления сульфидов меди, цинка и свинца, которые в основном связаны с южной частью массива. Скорее всего, данное распределение обусловлено тем, что с разных точек осуществлялся выпуск отходов с разной крупностью и минеральным составом.

С использованием горно-геологической информационной системы Micromine были построены гистограммы, которые отображают распределение компонента по выделенным блокам (рис. 2) [13]. При этом соединения железа (пирит и магнетит) имеют распределение, близкое к нормальному, в то время как распределение серы приближено к асимметрично нормальному (сосмещением моды вправо). Это является косвенным доказательством того, что пирит более равномерно распределен в теле мас-

сива, а остальные сульфиды сконцентрированы в отдельных частях. Позднее данная гипотеза была подтверждена результатами химического опробования в отдельных точках техногенного массива.

Равномерность распределения пирита обусловлена различным размером частиц, в которые он входит, а также его ассоциацией с минералами класса силикатов (в сравнении с сульфидами имеющих значительно меньший удельный вес). Относительно крупные частицы с высоким содержанием сульфида железа имеют большую гидравлическую крупность, соответственно, достаточно быстро осаждаются. Вместе с тем в массиве тонкодисперсные частицы с высоким содержанием пирита в потоке были перемещены на значительно большие расстояния [14].

Более тяжелые сульфиды меди и свинца осаждались намного быстрее, в связи с этим в южной части массива была выявлена зона со значительно более высо-

ким содержанием меди, свинца и цинка. К сожалению, в момент формирования хранилища учет химического состава укладываемого материала не осуществлялся, что несколько усложняет однозначные выводы. Однако даже визуальное описание отложений говорит об их разном составе в южной и северной частях. Об этом свидетельствуют цвет отложений, количество песчаной фракции в непосредственной близости от выпусков и степень сцементированности отложений.

Для оценки количественных показателей содержания рассматриваемых компонентов в отложениях были построены диаграммы, отображающие суммарное количество соединений и элементов в блоках с соответствующим средним содержанием (рис. 3).

Заключение

Осуществленное изучение и моделирование накопителя кека на основании выполненных работ по опробованию показало, что в процессе намыва формируются участки массива с высоким содержанием отдельных соединений. Хотя в то же время в силу технологических особенностей формирования

и изначального состава укладываемого материала другие элементы и минералы достаточно равномерно распределены в теле массива. Относительно низкие значения коэффициента вариации (менее 16%) для распределения пирита, магнетита и общей серы подтверждают данное утверждение.

В дальнейшем выявленные закономерности распределения компонентов могут быть использованы с целью разработки рекомендаций по проектированию комплексных исследований техногенных отложений, являющихся потенциальным минеральным сырьем. С учетом развития законодательной базы в области управления горнопромышленными отходами создание методики, позволяющей снизить стоимость оценки качественных показателей отложений хвостохранилищ, шламоохранилищ и других накопителей, является одной из первоочередных задач для отрасли. Кроме того, в условиях развивающихся цифровых технологий создание детализированных блочных моделей, в том числе хранилищ отходов, позволяет осуществлять оперативное планирование вовлечения минерального сырья с требуемыми показателями качества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов Ю. Н., Стадник Д. А., Стадник Н. М., Какорина Н. М., Волков С. С. Повышение качества прогнозной геологической информации при автоматизированном проектировании отработки запасов пластовых месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 3. — С. 164–171.
2. Li R., Wang G., Carranza E. J. M. GeoCube: A 3D mineral resources quantitative prediction and assessment system // Computers & Geosciences. 2016. Vol. 89. Pp. 161–173. DOI: 10.1016/j.cageo.2016.01.012.
3. Cheskidov V., Kassymkanova K.-K., Lipina A., Bornman M. Modern methods of monitoring and predicting the state of slope structures // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 105. Article 01001. DOI: 10.1051/e3sconf/201910501001.
4. Cheskidov V. V., Lipina A. V., Melnichenko I. A. Integrated monitoring of engineering structures in mining // Eurasian Mining. 2018. Vol 2. Pp. 18–21. DOI 10.17580/em.2018.02.05.
5. Антонов В. А. Методология геоинформационного отображения экспериментальных горно-технологических закономерностей // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 10. — С. 17–24. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-10-0-17-24.

6. Демьянов В. В., Савельева Е. А. Геостатистика: теория и практика. — М.: Наука, 2010. — 327 с.

7. Геостатистические методы в оценке запасов минерального сырья. Тезисы докладов 2-го Всесоюзного семинара по геостатистике, г. Петрозаводск, 1—5 окт. 1990 г. — Петрозаводск, 1990. — 89 с.

8. Кургузов К. В. Стохастическое моделирование литотехнических систем: дис. канд. геол.-мин. наук. — М.: РГГУ, 2019. — 161 с.

9. Strizhenok A. V., Ivanov A. V. An advanced technology for stabilizing dust producing surfaces of built-up technogenic massifs during their operation // Power Technology and Engineering. 2016. Vol. 50. Pp. 240—243. DOI: 10.1007/s10749-016-0690-y.

10. Bystrov V. P., Vernigora A. S., Kamkin R. I., Mamaev A. Y., Kuznetsov A. V., Paretsky V. M. Vanukov furnace technology: Application experience for processing different types of raw materials and general development trends / TMS Annual Meeting, 2nd International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing, 2011. Pp. 59—66. DOI: 10.1002/9781118062081.ch8.

11. Zawadzki J., Szuskiewicz M., Fabijanczyk P., Magiera T. Geostatistical discrimination between different sources of soil pollutants using a magneto-geochemical data set // Chemosphere. 2016. Vol. 164. Pp. 668—676. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.08.145.

12. Zuo R., Carranza J. Geoinformatics in applied geochemistry // Journal of Geochemical Exploration. 2016. Vol. 164. Pp. 1—2. DOI: 10.1016/j.gexplo.2016.03.003.

13. Singh P., Verma P. A comparative study of spatial interpolation technique (IDW and kriging) for determining groundwater quality / GIS and Geostatistical Techniques for Groundwater Science. Chapter 5. 2019. Pp. 43—56. DOI: 10.1016/B978-0-12-815413-7.00005-5.

14. Bech J., Bini C., Pashkevich M. A. Assessment, restoration and reclamation of mining influenced soils. London: Academic Press, 2017. 497 p. **MIAB**

REFERENCES

1. Kuznetsov Yu. N., Stadnik D. A., Stadnik N. M., Kakorina N. M., Volkov S. S. Quality improvement in forecasting geological information in automated mine planning and design for stratified deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2016, no 3, pp. 164—171. [In Russ].

2. Li R., Wang G., Carranza E. J. M. GeoCube: A 3D mineral resources quantitative prediction and assessment system. *Computers & Geosciences*. 2016. Vol. 89. Pp. 161—173. DOI: 10.1016/j.cageo.2016.01.012.

3. Cheskidov V., Kassymkanova K.-K., Lipina A., Bornman M. Modern methods of monitoring and predicting the state of slope structures. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 105. Article 01001. DOI: 10.1051/e3sconf/201910501001.

4. Cheskidov V. V., Lipina A. V., Melnichenko I. A. Integrated monitoring of engineering structures in mining. *Eurasian Mining*. 2018. Vol 2. Pp. 18—21. DOI 10.17580/em.2018.02.05.

5. Antonov V. A. Methodology of geoinformation display experimental mining-technological regularities. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no 10, pp. 17—24. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-10-0-17-24.

6. Dem'yanov V. V., Savel'eva E. A. *Geostatistika: teoriya i praktika* [Geostatistics: Theory and practice], Moscow, Nauka, 2010, 327 p.

7. *Geostatisticheskie metody v otsenke zapasov mineral'nogo syr'ya. Tezisy dokladov 2-go Vsesoyuznogo seminaru po geostatistike, Petrozavodsk, 1—5 oktyabrya 1990 g.* [Geostatistical methods in appraisal of mineral reserves. Proceedings of the 2nd All-Union Workshop on Geostatistics. Petrozavodsk, 1—5 October, 1990, Petrozavodsk, October 1—5, 1990], Petrozavodsk, 1990, 89 p. [In Russ].

8. Kurгузов К. В. *Stokhasticheskoe modelirovanie litotekhnicheskikh sistem* [Stochastic modeling of litho-technical systems], Candidate's thesis, Moscow, RGGU, 2019, 161 p.

9. Strizhenok A. V., Ivanov A. V. An advanced technology for stabilizing dust producing surfaces of built-up technogenic massifs during their operation. *Power Technology and Engineering*. 2016. Vol. 50. Pp. 240 – 243. DOI: 10.1007/s10749-016-0690-y.

10. Bystrov V.P., Vernigora A.S., Kamkin R.I., Mamaev A.Y., Kuznetsov A.V., Paretzky V.M. Vanukov furnace technology: Application experience for processing different types of raw materials and general development trends. *TMS Annual Meeting. 2nd International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing*. 2011. Pp. 59 – 66. DOI: 10.1002/9781118062081.ch8.

11. Zawadzki J., Szuskiewicz M., Fabijanczyk P., Magiera T. Geostatistical discrimination between different sources of soil pollutants using a magneto-geochemical data set. *Chemosphere*. 2016. Vol. 164. Pp. 668 – 676. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.08.145.

12. Zuo R., Carranza J. Geoinformatics in applied geochemistry. *Journal of Geochemical Exploration*. 2016. Vol. 164. Pp. 1 – 2. DOI: 10.1016/j.gexplo.2016.03.003.

13. Singh P., Verma P. A comparative study of spatial interpolation technique (IDW and kriging) for determining groundwater quality. *GIS and Geostatistical Techniques for Groundwater Science*. Chapter 5. 2019. Pp. 43 – 56. DOI: 10.1016/B978-0-12-815413-7.00005-5.

14. Bech J., Bini C., Pashkevich M.A. *Assessment, restoration and reclamation of mining influenced soils*. London: Academic Press, 2017. 497 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ческидов Василий Владимирович¹ — канд. техн. наук, доцент,
заместитель директора Горного института,
e-mail: vcheskidov@misis.ru,

Барабанов Николай Николаевич¹ — аспирант;
геолог, GeoSolutions, e-mail: m1605561@edu.misis.ru,

Ложкин Максим Олегович¹ — аспирант,

Смирнов Павел Александрович¹ — аспирант;
инженер по технической поддержке,

ОАО «Орика СиАйЭс»,

Лагутина Анастасия Андреевна¹ — аспирант,

¹ ГИ НИТУ «МИСиС».

Для контактов: Барабанов Н.Н., e-mail: m1605561@edu.misis.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.V. Cheskidov¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

Deputy Director of the College of Mining,

e-mail: vcheskidov@misis.ru,

N.N. Barabanov¹, Graduate Student; Geologist, Geosolutions,

119590, Moscow, Russia, e-mail: m1605561@edu.misis.ru,

M.O. Lozhkin¹, Graduate Student,

P.A. Smirnov¹, Graduate Student;

Technical Support Engineer, Orika CIS, 125315, Moscow, Russia,

A.A. Lagutina¹, Graduate Student,

¹ Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS»,

119049, Moscow, Russia

Corresponding author: N.N. Barabanov, e-mail: m1605561@edu.misis.ru.

Получена редакцией 13.05.2020; получена после рецензии 16.09.2020; принята к печати 10.02.2021.

Received by the editors 13.05.2020; received after the review 16.09.2020; accepted for printing 10.02.2021.