

## Разработка метода районирования техногенных массивов

И.А. Мельниченко✉, Ю.В. Кириченко

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Горный институт, г. Москва, Российская Федерация  
✉ kors-ilyay@mail.ru

**Резюме:** Современная горнопромышленная отрасль представляет сложную систему, непрерывно расширяющуюся как со стороны разведываемых источников минерального сырья, так и со стороны разработки новых подходов к добыче и переработке полезных ископаемых. Такое наращивание объемов задач, ставящихся перед отраслью, а также технический прогресс порождают различные проблемы, связанные с качеством, количеством и рациональным использованием минерального сырья. Рационализация, в свою очередь, должна осуществляться поэтапно через применение комплексных мер, одна из которых – вторичное использование техногенных отходов, представленных отвальными породами, хвостами, шлаком, пылью и др. Кроме того, такой подход параллельно решает еще несколько важных проблем отрасли – повышение экологической безопасности горнодобывающих регионов и повышение экономической целесообразности производства за счет извлечения из отходов дополнительных компонентов. Сфера применения такого ответа на поставленный вопрос рационализации производства необъятна и может быть реализована для многих месторождений, располагающихся на территории стран СНГ, в силу наличия огромных объемов отходов добычи сырья, возникших из-за отсутствия в прошлом полноценных технологий извлечения из горной массы полезных компонентов, а также иных, нежели в настоящее время, кондиционных требований к руде. К примеру, в Республике Башкортостан, отвалы вскрыши месторождений и забалансовых руд, разрабатываемых ранее горнорудными предприятиями, составляют более 1 млрд т, гидроотвалы обогатительных фабрик – около 50 млн т, техногенные воды – более 9 млн м<sup>3</sup> в год, а тоннаж содержащихся в них полезных компонентов может достигать 1,5 млн т меди, 2 млн т цинка, около 100 т золота и значительное количество иных попутных компонентов, включающих различные нерудные образования.

**Ключевые слова:** горное дело, техногенный массив, горнопромышленные отходы, кек, опробование, геостатистика, переработка отходов, намывной массив, метод обратных взвешенных расстояний, сульфиды, хвостохранилище, инженерно-геологическое районирование

**Для цитирования:** Мельниченко И.А., Кириченко Ю.В. Разработка метода районирования техногенных массивов. *Горная промышленность*. 2021;(3):116–122. DOI 10.30686/1609-9192-2021-3-116-122.

## Development of Zoning Method for Man-Made Massifs

I.A. Melnichenko✉, Yu.V. Kirichenko

National Research Technological University «MISIS», Moscow, Russian Federation  
✉ kors-ilyay@mail.ru

**Abstract:** Contemporary mining industry is a complex system that is constantly expanding both in terms of explored sources of mineral raw materials and in terms of developing new approaches to mining and processing of minerals. Such a buildup in the scope of tasks set for the industry, as well as the technical progress, lead to various issues related to the quality, quantity and rational use of mineral raw materials. Rationalization, in its turn, should be carried out in a phased manner through the use of comprehensive measures, one of which is reclamation of man-made wastes, represented by waste rocks, tailings, slags, dust, etc. In addition, this approach simultaneously resolves several other important challenges the industry is facing, e.g. increasing the environmental safety of mining regions and increasing the economic feasibility of production by extracting additional components from waste materials. The scope of application of such a solution to the challenge of rationalizing production is immense and can be implemented at many deposits located in the territory of the CIS due to the presence of huge volumes of waste generated by mining raw materials. These wastes were accumulated because of the absence of full-fledged technologies to extract useful components from the rock mass in the past as well as other requirements to ore conditioning than those acting today. For example, in the Republic of Bashkortostan, the overburden dumps and off-balance ores that have been created by mining enterprises amount to more than 1 billion tons, hydraulic-mine dumps of processing plants reach 50 million tons, man-made waters exceed 9 million m<sup>3</sup> annually. At the same time, the amount of useful components contained in these man-made deposits can be up to 1.5 million tons for copper, 2 million tons for zinc, about 100 tons of gold as well as significant amounts of other associated components, including various non-metallic formations.

**Keywords:** mining, man-made massif, mining wastes, geostatistics, waste processing, hydraulic fill dump, Inverse distance weighting method, sulfides, tailing dump

**For citation:** Melnichenko I.A., Kirichenko Yu.V. Development of Zoning Method for Man-Made Massifs. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2021;(3):116–122. (In Russ.) DOI 10.30686/1609-9192-2021-3-116-122.

## Введение

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.

Необходимо 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 получают право использовать отходы для собственных производственных и технологических нужд [1].

Немаловажной составляющей вышеупомянутого законопроекта является часть, связанная с предоставлением информации в государственные органы. Наличие достоверных данных о содержании полезных компонентов в хвостохранилищах и отвалах позволит повысить инвестиционную привлекательность по переработке горнопромышленных отходов [1].

## Основные особенности отложений хвосто- и шламохранилищ

Можно 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, атмосферы и литосферы.

Изменение качественных показателей потенциального техногенного сырья при длительном хранении обуславливает необходимость разработки технологий его использования еще на стадии проектирования добывающих комплексов. Выполнение этого условия невозможно без всестороннего комплексного исследования не только полезного ископаемого, но и вмещающих и вскрышных пород, а также анализа опыта исследования на подобных месторождениях.

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 элементов, которые в используемой технологической цепочке полностью уходят в отходы.

## Основные сведения об объекте исследований

Хранилище кека медно-цинкового производства представляет собой наливной техногенный массив, сброс

пульпы осуществлялся рассредоточенно из трех точек по пульпопроводам диаметром 377 мм. Бурением было установлено, что структура техногенного массива слоистая, мощность прослоев отложений со схожими свойствами может составлять от нескольких сантиметров до метра и более. Площадь намывного массива 75 683 м<sup>2</sup>. Объем накопленных хвостов 125 586 м<sup>3</sup>. Максимальная выявленная мощность изучаемого массива может составлять 3–4 м. Ложе массива кека хранилища строится на основании проектной документации и топоосновы.

Для формирования представительного набора образцов техногенных отложений в соответствии с принципами проектирования сетей инженерно-геологического опробования разрабатывается система профилей с расположенными на них точками отбора проб (рис. 1). 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 [2–4].

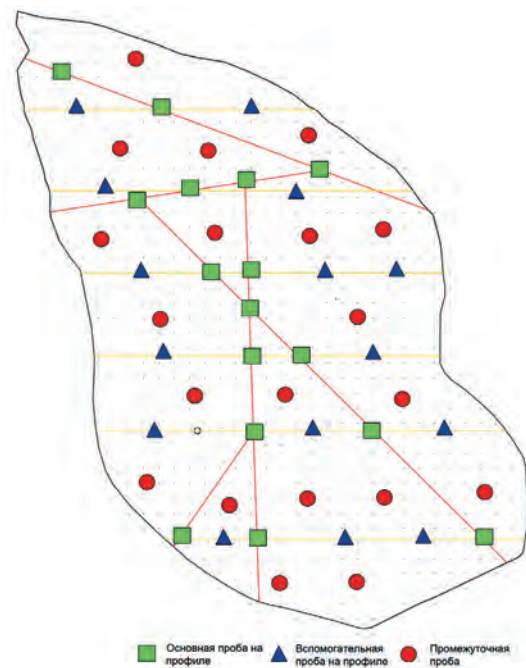


Рис. 1  
Спроектированная сеть инженерно-геологического опробования хранилища кека

Fig. 1  
Designed network of engineering-geological testing of the cake storage

## Отбор проб техногенных отложений

Отбор производился из шлама скважин, пройденных с помощью ручного бензобура диаметром 150 мм (рис. 2).

На каждой скважине производился отбор проб с применением стандартных методов квартования материала, полученного из тела намывного массива, также замерялась глубина скважины и записывались характеристики техногенных отложений для учета изменения их характеристик (рис. 2, 3).

Верхний слой намывного массива до глубины 200–300 мм в основном сухой, ниже – до глубины 500 мм – техногенные отложения находились в мерзлом состоянии, что позволяло находиться на поверхности и проводить бурение. В летний период несущая способность отложений намывного массива слишком низкая, чтобы производить



**Рис. 2**  
Бур с коричневой пастообразной субстанцией



**Рис. 3**  
Замер глубины скважины

**Fig. 2**  
A drill with brown paste-like substance

**Fig. 3**  
Borehole depth measurement

работы. Значительная часть тела прудка представляет пастообразную массу с явным разделением по цвету, зависящему от глубины (рис. 4 и 5).

**Подготовка проб и проведение химических исследований**

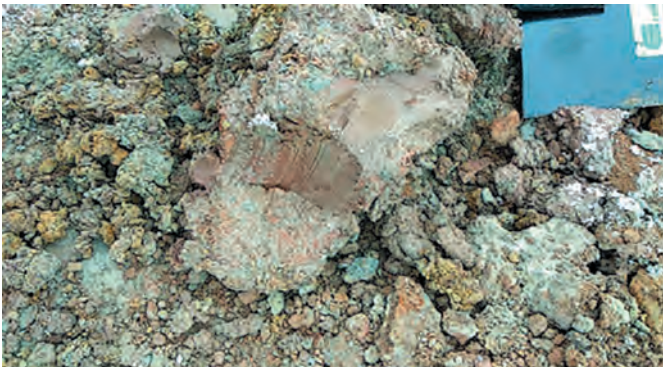
Перед проведением химического анализа и определением влажности исследуемого материала необходимо отобрать пробы, соответствующие следующим критериям:

- проба должна быть представительной, т. е. она должна быть одинаковой с основной массой материала по химическому составу и физическим свойствам;
- проба материала должна быть технически удобной для проведения анализов, что предопределяет требование минимизации массы пробы, но которая должна в то же время обеспечить необходимое количество и точность последующих анализов или намеченных при технологических исследованиях опытов [5; 6].

Выполнение этих критериев достигается при реализации метода сокращения массы пробы, состоящего из трех этапов:

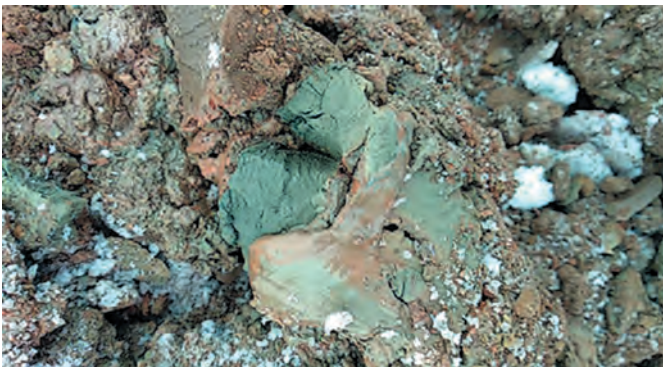
- вся масса, извлеченная из пробуренной скважины, перемешивается, чтобы полученная смесь получилась приближенной к однородной по составу;
- масса, полученная на первом этапе, квартуется, т.е. разделяется ровным слоем и разделяется на 4 части (рис. 6);
- из четырех частей две удаляются, а две вновь перемешиваются;

Для оставшейся массы этапы 1–3 повторяются до тех



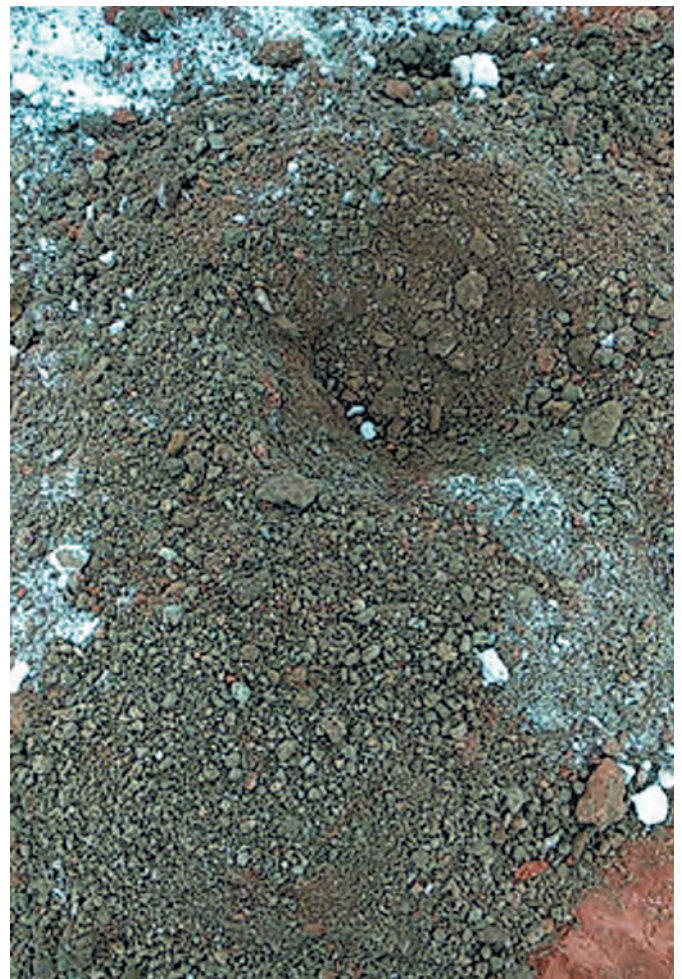
**Рис. 4**  
Техногенные отложения преимущественно красно-коричневых тонов, что указывает на потенциально высокое содержание оксидов железа

**Fig. 4**  
Man-made deposits of predominantly red-brown shades that indicate a potentially high content of iron oxides



**Рис. 5**  
Техногенные отложения преимущественно серо-зеленых тонов, что указывает на потенциально высокое содержание меди

**Fig. 5**  
Man-made deposits of predominantly gray-green shades that indicate a potentially high copper content



**Рис. 6**  
Квартование намывной массы

**Fig. 6**  
Coning and quartering of the reclaimed mass

пор, пока ее количество не уменьшится до необходимого для последующего анализа. Вышеперечисленная последовательность действий необходима не только для уменьшения объема анализируемой массы, но и для усреднения.

Дальнейший анализ влажности исходного материала производился по данным, полученным непосредственно по точкам опробования, а также по данным, прошедшим лабораторный анализ.

Как можно заметить, преобладающая масса в прудке на различных глубинах – или пластичная, или мерзлая, с цветом от серого до зеленого и коричневого. Встречаются прослойки льда, затрудняющие бурение и анализ (рис. 7).



Рис. 7  
Прослойки льда в теле  
намывного массива

Fig. 7  
Layers of ice inside the  
hydraulically filled massif

Были проведены по каждой из 49 точек (рис. 8) опробования лабораторные испытания по определению влажности техногенных отложений [7; 8].

Кроме этого, перед сушкой был замерен уровень pH для всех отобранных проб при помощи лакмусовой индикаторной бумаги (рис. 9, 10).

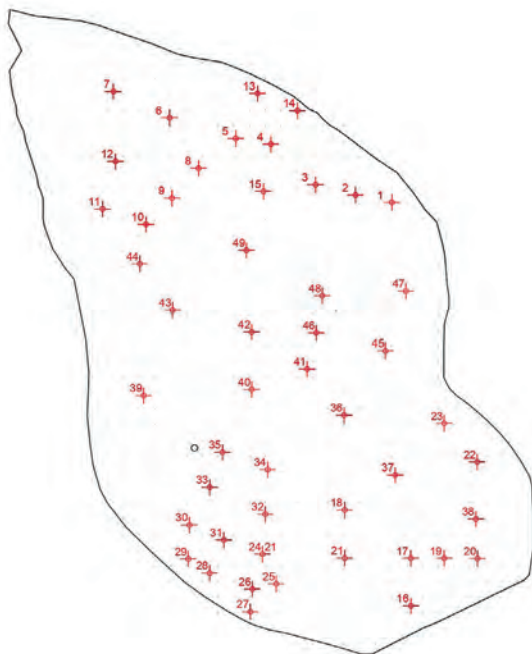


Рис. 8  
Точки отбора проб  
из хвостохранилища кека

Fig. 8  
Sampling points  
at the cake tailing dump



Рис. 9  
Проба кека, отобранная из  
массива намывного прудка:  
а – до сушки;  
б – после сушки



Fig. 9  
Sample of the cake taken from  
the hog box mass:  
а – before drying;  
б – after drying



Рис. 10  
Лакмусовая индикаторная  
бумага pH 1–2

Fig. 10  
Litmus pH 1–2  
test paper

Результаты измерения pH проб сравнивались с эталоном (рис. 11) и свидетельствовали о крайне низком водородном показателе, вследствие чего среда хранилища была отнесена к агрессивной. Агрессивность кека при разработке проекта использования отложений хранилища окажет негативное влияние на срок службы техники, осуществляющей забор и доставку материала.



Рис. 11  
Эталонная шкала  
для pH

Fig. 11  
Reference pH  
scale

Отобранные пробы кека подвергались сушке в трехсекционном сборном сушильном шкафу типа ЭШС-30.8.12 с рециркуляцией воздуха, сушильный шкаф специально предназначен для сушки влажных геологических проб при окислительной атмосфере и температуре до 110 °С, с последующим замером массы пробы (рис. 12).



**Рис. 12**  
Электрощаф для сушки проб ЭШС-30.8.12

**Fig. 12**  
EShS-30.8.12 Electrical Cabinet for sample drying

Основной целью изучения отложений хранилища было обоснование возможности извлечения из него полезного компонента: в первую очередь пирита, в состав кристаллов которого входит золото в концентрации, представляющей промышленный интерес. Для изучения закономерностей распределения перечисленных компонентов и подсчета общих запасов был выбран комплекс геостатистических методов. Геометрическое моделирование осуществлялось на принципах построения блочного моделирования, в качестве основы был выбран технологический массив хранилища кека, с последующим его районированием по влажности.

**Методика проведения инженерно-геологического районирования**

Строится модель изучаемого накопителя по данным, полученным в результате опробования кека хранилища, методом обратных взвешенных расстояний (IDW-метод). В каждом выделенном блоке (размер определен экспертным путем) производится оценка влажности массива [9–11].

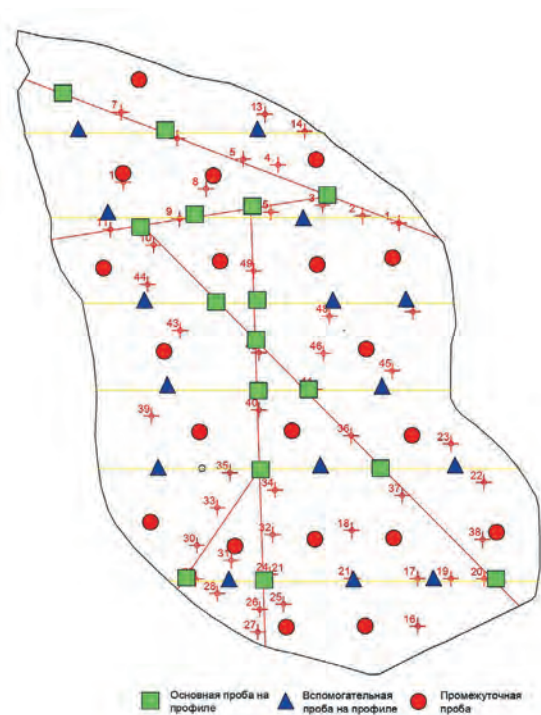
С помощью метода кросс-валидации был выбран показатель степени, который использовался при вычислении весов (w) в IDW-методе:

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

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

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

где  $x_i$  и  $y_i$  – координаты точки, в которой проводился

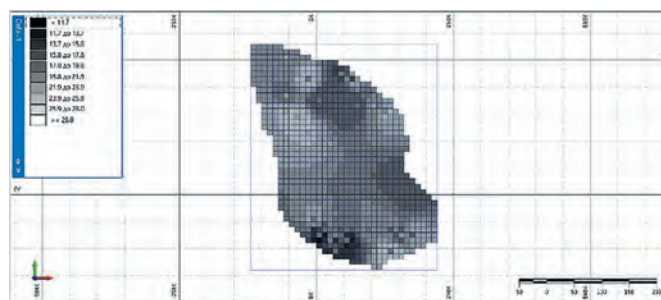


**Рис. 13**  
Точки отбора проб и сеть инженерно-геологического опробования хранения хвостохранилища кека

**Fig. 13**  
Sampling points and a network of engineering-geological testing of the cake tailing dump

отбор проб для дальнейших аналитических исследований;  $x_k$  и  $y_k$  – координаты рассматриваемой точки;  $\beta$  – степенной показатель при вычислении весов;  $S$  – сумма всех расстояний от рассматриваемой точки до точек замера параметров, возведенных в степень  $\beta$ .

Расчеты с помощью метода кросс-валидации были произведены в разработанной на кафедре ГМД Горного института программе. При этом на каждом этапе из генеральной 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  $\beta$  в интервале от 0,5 до 5. Наименьшая ошибка была получена для всех выборок при значении  $\beta = 4$ . Во многом это обусловлено тем, что границы между участками с низкими и высокими содержаниями рассматриваемых компонентов плавные [1; 12].



**Рис. 14**  
Оценка влажности в блоках по исследуемой территории

**Fig. 14**  
Assessment of moisture content in blocks in the study area

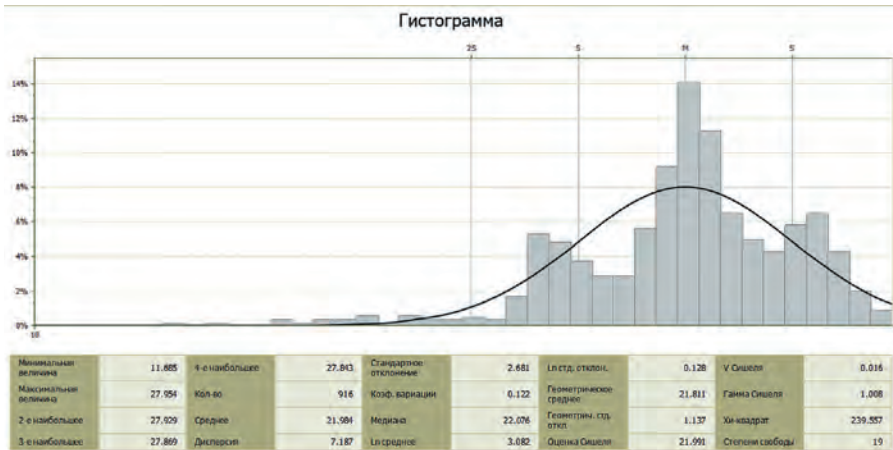


Рис. 15  
Гистограмма влажности

Fig. 15  
Moisture content bar chart

На основании результатов блочной модели были проведены геостатистические расчеты, отражающие распределение влажности в хранилище. Они представлены на рис. 15.

Визуальный анализ результатов, полученных на рис. 14, а также статистический, проведенный по рис. 15, свидетельствуют о том, что распределение влажности в прудке достаточно однородное, что связано с условиями образования и горизонтальным расположением намывного массива. При этом часть хранилища, подходящая по требованиям к влажности, меньшей или равной 12%, занимает незначительную площадь. Вследствие этого добавление различных присадок и связующих материалов является необходимым для исходных отложений. Для медно-цинковых руд роль присадки может быть выполнена сульфидным медным концентратом или лежалыми хвостами обогатительной фабрики. В обоих случаях влажность смеси станет равной 8% или же менее. Также связующей добавкой может являться цемент, добавляющий пластичности и последующего затвердевания.

Таким образом, влажность гранул после всех этапов их проработки и сушки в естественных условиях будет составлять не более 8–10%, что подходит для принятого нами ранее порогового значения.

Проведенное моделирование и последующий анализ результатов показали, что коэффициент вариации для полученных выборок (каждый расчетный блок считаем отдельным элементом выборки) не превышает значения 10%. Такое низкое значение обусловлено условиями формирования массива, за счет гидравлической укладки кека и формирования массива с трех точек в значительной мере произошло усреднение отложений [13].

Районирование позволит определить порядок отработки хранилища, выделить зоны, требующие дополнительной подготовки, выбрать оборудование и спроектировать всю технологическую цепочку.

**Список литературы**

1. 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):142–153. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-3-0-142-153
2. 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):164–171. Режим доступа: [https://giab-online.ru/files/Data/2016/3/164\\_171\\_03\\_2016.pdf](https://giab-online.ru/files/Data/2016/3/164_171_03_2016.pdf)
3. Li R., Wang G., Carranza E. J. M. GeoCube: A 3D mineral resources quantitative prediction and assessment system. *Computers & Geosciences*. 2016;89:161–173. DOI: 10.1016/j.cageo.2016.01.012
4. Антонов В.А. Методология геоинформационного отображения экспериментальных горнотехнологических закономерностей. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017;(10):17–24. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-10-0-17-24

**Выводы**

Хранилище кека представляет собой намывной массив наливного типа. Выбор намывных массивов для решения проблемы рационализации горного производства не случаен, так как именно гидроотвалы и хвостохранилища являются наиболее представительными объектами по объему и площади, а также по степени и времени негативного воздействия на окружающую среду. Кроме того, в намывных массивах накоплены значительные объемы измельченного материала, перспективного для извлечения полезных компонентов.

Материал в исходном прудке тонкодисперсный и дифференцированный по цвету от серого до коричневого. Средняя влажность автоклавного кека, содержащегося в прудке одного из предприятий,сосредоточенного на добыче медно-цинковых руд, составляет 21,7%. Пороговое значение влажности для конечной продукции – гранул – было принято равным 12%. Для всего произведенного материала влажность должна быть равна или меньше, чем это значение.

В ходе работы были произведены расчеты влажности исходного материала, а также смоделировано хранилище с распределением влажности в зависимости от расположения точек забора проб и точек, значение влажности в которых спрогнозировано. Благодаря приведенным рекомендациям по снижению влажности исходного автоклавного кека за счет связующих и присадок, его перевозка к месту доведения до конечной продукции может осуществляться стандартной техникой, самосвалами или конвейерами. Дополнительной просушки материала не требуется.

В промышленных масштабах сушка кека, проведенная для данного исследования, может быть ресурсозатратной на первых этапах запуска проекта по рационализации горного производства за счет вовлечения в производство вторичного материала, так как на сегодняшний день не существует единого и экономически целесообразного способа сушки кека, а главными основными аппаратными проблемами являются высокие затраты электроэнергии и липкая консистенция кека. Однако данная проблема решается первоначальным забором материала из зон с наименьшей влажностью, определенных блочной моделью в программном обеспечении Micromine в рамках районирования массива. Данные зоны легко определяются по площади и координатам при проецировании блочной модели на карту районирования с масштабированием.

5. Демьянов В.В., Савельева Е.А. *Геостатистика: теория и практика*. М.: Наука; 2010. 327 с.
6. *Геостатистические методы в оценке запасов минерального сырья (Тез. докл. 2-го Всесоюз. семинара по геостатистике, 2. Петрозаводск, 1–5 окт. 1990 г.)*. Петрозаводск; 1990. 89 с.
7. Кургузов К.В. *Стохастическое моделирование литотехнических систем: дис. ... канд. геол.-мин. наук*. М.; 2019. 161 с.
8. 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;50(3):240–243. DOI: 10.1007/s10749-016-0690-y
9. Bystrov V.P., Paretsky V.M., Vernigora A.S., Kamkin R.I., Mamaev A.Y., Kuznetsov A.V. Vanukov furnace technology: Application experience for processing different types of raw materials and general development trends. In: Hwang J.-Ya., Drelich J., Downey J., Jiang T., Cooksey M. (eds) *2nd International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing*. The Minerals, Metals & Materials Society; 2011. P. 59–66. DOI: 10.1002/9781118062081.ch8
10. Zawadzki J., Szuskiewicz M., Fabijanczyk P., Magiera T. Geostatistical discrimination between different sources of soil pollutants using a magneto-geochemical data set. *Chemosphere*. 2016;164:668–676. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.08.145
11. Zuo R., Carranza J. Geoinformatics in applied geochemistry. *Journal of Geochemical Exploration*. 2016;164:1–2. DOI: 10.1016/j.gexplo.2016.03.003
12. Singh P., Verma P. A comparative study of spatial interpolation technique (idw and kriging) for determining groundwater quality. In: Venkatramanan S., Prasanna M.V., Chung S.Y. (eds) *GIS and Geostatistical Techniques for Groundwater Science*. Elsevier; 2019. P. 43–56. DOI: 10.1016/B978-0-12-815413-7.00005-5
13. Bech J., Bini C., Pashkevich M.A. *Assessment, restoration and reclamation of mining influenced soils*. London: Academic Press; 2017. 497 p.

**References**

1. 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
2. Kuznetsov Yu.N., Stadnik D.A., Stadnik N.M., Kakorina N.M., Volkov S.S. Improving the quality of predictive geological information at the automated designing mining of stratified deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2016;(3):164–171. (In Russ.) Available at: [https://giab-online.ru/files/Data/2016/3/164\\_171\\_03\\_2016.pdf](https://giab-online.ru/files/Data/2016/3/164_171_03_2016.pdf)
3. Li R., Wang G., Carranza E. J. M. GeoCube: A 3D mineral resources quantitative prediction and assessment system. *Computers & Geosciences*. 2016;89:161–173. DOI: 10.1016/j.cageo.2016.01.012
4. Antonov V.A. Methodology of geoinformation display experimental mining-technological regularities. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017;(10):17–24. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2017-10-0-17-24
5. Demiyarov V.V., Savelieva E.A. *Geostatistics: Theory and Practice*. Moscow: Nauka; 2010. 327 p. (In Russ.)
6. *Geostatistical Methods in Mineral Resources Assessment (Proceedings of the 2nd All-Union Seminar on Geostatistics, Petrozavodsk, October 1-5, 1990)*. Petrozavodsk; 1990. 89 p. (In Russ.)
7. Kurguzov K.V. *Stochastic Modeling of Lithotechnical Systems. Dissertation for PhD in Geology and Mineralogy*. Moscow; 2019. 161 p. (In Russ.)
8. 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;50(3):240–243. DOI: 10.1007/s10749-016-0690-y
9. Bystrov V.P., Paretsky V.M., Vernigora A.S., Kamkin R.I., Mamaev A.Y., Kuznetsov A.V. Vanukov furnace technology: Application experience for processing different types of raw materials and general development trends. In: Hwang J.-Ya., Drelich J., Downey J., Jiang T., Cooksey M. (eds) *2nd International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing*. The Minerals, Metals & Materials Society; 2011. P. 59–66. DOI: 10.1002/9781118062081.ch8
10. Zawadzki J., Szuskiewicz M., Fabijanczyk P., Magiera T. Geostatistical discrimination between different sources of soil pollutants using a magneto-geochemical data set. *Chemosphere*. 2016;164:668–676. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.08.145
11. Zuo R., Carranza J. Geoinformatics in applied geochemistry. *Journal of Geochemical Exploration*. 2016;164:1–2. DOI: 10.1016/j.gexplo.2016.03.003
12. Singh P., Verma P. A comparative study of spatial interpolation technique (idw and kriging) for determining groundwater quality. In: Venkatramanan S., Prasanna M.V., Chung S.Y. (eds) *GIS and Geostatistical Techniques for Groundwater Science*. Elsevier; 2019. P. 43–56. DOI: 10.1016/B978-0-12-815413-7.00005-5
13. Bech J., Bini C., Pashkevich M.A. *Assessment, restoration and reclamation of mining influenced soils*. London: Academic Press; 2017. 497 p.

**Информация об авторах**

**Мельниченко Илья Ашотович** – аспирант кафедры геологии и маркшейдерского дела, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Московский институт стали и сплавов, Горный институт, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: kors-ilya@mail.ru  
**Кириченко Юрий Васильевич** – доктор технических наук, профессор кафедры геологии и маркшейдерского дела, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Горный институт, г. Москва, Российская Федерация

**Информация о статье**

Поступила в редакцию: 01.06.2021  
 Поступила после рецензирования: 14.06.2021  
 Принята к публикации: 21.06.2021

**Information about the authors**

**Ilya A. Melnichenko** – Graduate Student Department of Geology and Mine Surveying, National Research Technological University “MISIS”, Moscow, Russian Federation; e-mail: kors-ilya@mail.ru  
**Yury V. Kirichenko** – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, National Research Technological University “MISIS”, Moscow, Russian Federation

**Article info**

Received: 01.06.2021  
 Revised: 14.06.2021  
 Accepted: 21.06.2021