ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025;(1):66-79
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.235:622.1 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_1_0_66

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СБРОСА ВЗОРВАННОЙ ГОРНОЙ МАССЫ В ВЫРАБОТАННОЕ ПРОСТРАНСТВО КАРЬЕРА

М.А. Маринин[1], Д.А. Илюхин[1], Р.А. Рахманов[2], И.А. Аленичев[3]

[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: Ilyukhin_DA@pers.spmi.ru
[2] Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН, Москва, Россия
[3] ООО «УК Полюс», Москва, Россия

Аннотация: Приведены результаты исследования параметров сброса горной массы в выработанное пространство карьера при проведении массовых взрывов. Инструментальный контроль объема сброса взорванной горной массы для блоков, расположенных вблизи отработанного карьерного поля, малоэффективен (практически невозможен) ввиду большой высоты сброса и, как следствие, большой площади разброса породы. Косвенными методами установлено, что значительное влияние на величину сброса оказывает величина угла откоса уступа. Так, при угле откоса более 60º для 15-метрового уступа замечено существенное нарастание величины сброса, которое достигает значений 90–130 м^3/м. Значение наибольшего объема сброса для условий исследуемого объекта можно принимать в 180 м^3/м (при выполнении следующих условий: угол откоса уступа более 80º; отсутствие дополнительного замедления первых скважин в ряду (эшелоне) по бровке уступа). В формировании сброса участвуют преимущественно скважины 1-го и 2-го рядов от верхней бровки уступа, при этом, как показали исследования, в случае применения увеличенных интервалов замедлений для этих рядов с направлением действия взрыва в противоположную сторону от выработанного пространства объем сброса существенно уменьшается и составляет 50–90 м^3/м.

Ключевые слова: карьер, открытые горные работы, маркшейдерская съемка, фотограмметрический метод съемки, автоматизированная аэрофотосъемка, взрывной блок, взорванная горная масса.

Для цитирования: *Маринин М. А., Илюхин Д. А., Рахманов Р. А., Аленичев И. А.* Оценка параметров сброса взорванной горной массы в выработанное пространство карьера // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 1. – С. 66–79. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_1_0_66.

Parameters of blast throw of rocks to mined-out void of open pit

M.A. Marinin[1], D.A. Ilyukhin[1], R.A. Rakhmanov[2], I.A. Alenichev[3]

[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: Ilyukhin_DA@pers.spmi.ru
[2] Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
[3] UK Polyus, Moscow, Russia

© М.А. Маринин, Д.А. Илюхин, Р.А. Рахманов, И.А. Аленичев. 2025.

Abstract: The article reports the studies on the parameters of blast throw of rocks to the mined-out void of an open pit during large-scale blasting. The instrumental monitoring of the blast throw volume is low-effective (almost impossible) on blocks located near the mined-out void because of the long drop and, consequently, the large area of dispersion of blasted rocks. The indirect methods find out that a substantial influence is exerted on the blast throw volume by the value of the slope angle. For instance, for a 15 m-high slope with the slope angle greater than 60 deg, the blast throw volume grows and reaches 90–130 m^3/m. The highest blast throw volume for the test open pit should be assumed as 180 m^3/m (given that the following conditions are fulfilled: the slope angle is greater than 80 deg; no additional delay in the first blast holes in a row along the slope edge). A blast throw is mostly formed by the blast holes in the 1st and 2nd rows at the slope edge. The studies show that in case of the longer delays in these rows, with the blast action directed off the mined-out void, the blast throw volume drops to 50–90 m^3/m.

Key words: open pit, open pit mining, surveying, photogrammetric method, automated aerial survey, blasting block, blasted rocks.

For citation: Marinin M. A., Ilyukhin D. A., Rakhmanov R. A., Alenichev I. A. Parameters of blast throw of rocks to mined-out void of open pit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(1):66-79. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_1_0_66.

Введение

В настоящее время разработка крутопадающих залежей открытым способом сопровождается увеличением глубины карьеров, что приводит к росту объемов выемки из недр и формированию на поверхности карьера отвалов и складов из горной массы [1, 2]. Экономическая эффективность отработки глубоких карьеров обеспечивается за счет разработки карьера этапами (очередями) [3—5]. Разработка таких месторождений сопровождается увеличением текущего коэффициента вскрыши с увеличением глубины отработки и формированием временно нерабочих бортов (ВНБ) [6—8]. При расконсервации ВНБ в подготовку буровзрывным способом и отработку экскаваторно-автомобильным комплексом вводятся вышележащие вскрышные горизонты [9—12]. При проектировании буровзрывных работ (БВР) на таких горизонтах требуется учитывать наличие открытой поверхности массива со стороны выработанного карьерного пространства. Смещение и сброс горной массы взрывом в направлении выработанного пространства требует последующей экскавации и транспортирования с нижележащих горизонтов, что заведомо является экономически нецелесообразной перспективой [13]. Кроме того, с понижением горных работ располагаемые рудные тела на приконтурных участках разрабатываемого нового этапа карьера подвергаются «вынужденному» технологическому сбросу, что также существенно отражается на экономике разрабатываемого карьера.

На текущем этапе развития технологии БВР уже имеется достаточное количество способов и схем взрывания, направленных на минимизацию смещений горной массы и методов их оценки [14—17]. При этом с учетом развития систем взрывания и внедрения электронных систем инициирования, позволяющих более эффективно управлять развалом, а также развитием технических средств маркшейдерского обеспечения и реализации возможностей более точных измерений, открываются новые

возможности к изучению закономерностей сбросов и совершенствованию параметров БВР в зонах потенциального сброса взорванной горной массы (ВГМ) [18—21].

Таким образом, подбор параметров БВР, направленных на минимизацию объемов сброса ВГМ, при проектировании взрывных блоков с открытой поверхностью со стороны выработанного пространства карьера является актуальной задачей для инженеров-взрывников. Для решения данной задачи требуется наличие эффективной методики оценки объемов сброса горных пород. В работе [22] приведены исследования закономерностей сброса горной массы взрывом в выработанное пространство карьера. Для условий открытой разработки крутопадающего рудного месторождения установлено, что основной сброс ВГМ формируется объемом горной массы с первого и второго рядов скважин и ограничивается призмой угла естественного откоса. В продолжение исследования закономерностей сброса ВГМ в настоящей работе предложен метод оценки параметров сброса в выработанное пространство карьера посредством применения оперативной фотограмметрической съемки ВГМ с применением беспилотных летательных аппаратов (БЛА) [23—27]. Данный метод может быть использован для последующих более глубоких исследований схем взрывания, в том числе с применением электронных систем инициирования (ЭСИ) [28, 29].

Объект и методы исследования

Объектом исследования в работе являются объемы ВГМ, перемещаемые в выработанное карьерное пространство. На рис. 1 приведен пример характерного массового взрыва со смещением ВГМ в выработанное пространство карьера.

Исследования проводились на вскрышных участках, производящих подготовку крутопадающего рудного тела месторождения. На начало исследования горные работы ведутся на промежуточных горизонтах карьера. Вышележащие уступы над рабочей зоной карьера находятся в конечном положении в рамках действующего этапа разработки карьера. А горизонты ниже рабочей зоны карьера находятся в нерабочем законсервированном состоянии. Буровзрывная подготовка пород к выемке с последующей экскавацией и транспортированием ВГМ ведется с постоянной углубкой и понижением горных работ. Инструмен-

Рис. 1. Пример смещения ВГМ при массовом взрыве на краю выработанного пространства карьера
Fig. 1. An example of displacement of the blasted rock mass during a massive explosion at the edge of the mined-out space of a quarry

Рис. 2. Участок цифровой модели борта карьера
Fig. 2. Section of the digital model of the quarry side

тальная оценка сброса ВГМ в выработанное пространство карьера с применением традиционных маркшейдерских приборов в текущих условиях отработки месторождения представляется крайне затруднительной. Взрывание на участках буровых блоков, примыкающих к выработанному карьерному пространству, сопряжено с значительной высотой сброса, более 300 м (рис. 2), что приводит к формированию насыпей с углом естественного откоса на нижележащих бермах вплоть до донной части карьера. Важно отметить, что целью учета таких насыпей является в том числе подготовка календарных планов горных работ.

Съемка изменения уровня нижележащих уступов до и после производства взрывных работ с достаточной точностью не представляется возможной даже с применением БЛА ввиду значительной площади разлета ВГМ и неоднозначности определения ее контура [30, 31]. Кроме того, для качественной обработки данных фотограмметрической съемки с последующим построением поверхности геометрии ВГМ требуется фиксация и определение координат элементов внешнего ориентирования методами маркшейдерских измерений [32, 33]. Текущий план развития горных работ не подразумевает наличие доступа к нижележащим горизонтам, вследствие чего возможность выполнения указанных операций имеется только в районе взрываемого блока, вследствие чего большая часть площади разлета ВГМ остается лишенной точной геометрической привязки.

Параметры БВР на исследуемых блоках были схожими и соответствуют следующим значениям: сетка скважин преимущественно 8,6×7,5 для диметра скважин 311 мм, удельный расход взрывчатого вещества по блоку от 1 до 1,2 кг/м^3. Взрывная схема инициирования проектировалась с применением как неэлектрической системы инициирования (НСИ), так и ЭСИ (таблица). Схема взрывания принималась с учетом конкретных условий взрывания: наличия свободных поверхностей от ранее взорванного блока, минимизации сброса и разлета кусков породы с учетом расположения горного оборудования на момент проведения взрыва и т.п. Типовые применявшиеся схемы взрыва приведены на рис. 3.

На рис. 4 приведены поперечный разрез поверхностей, построенных по данным съемки блока и части выработан-

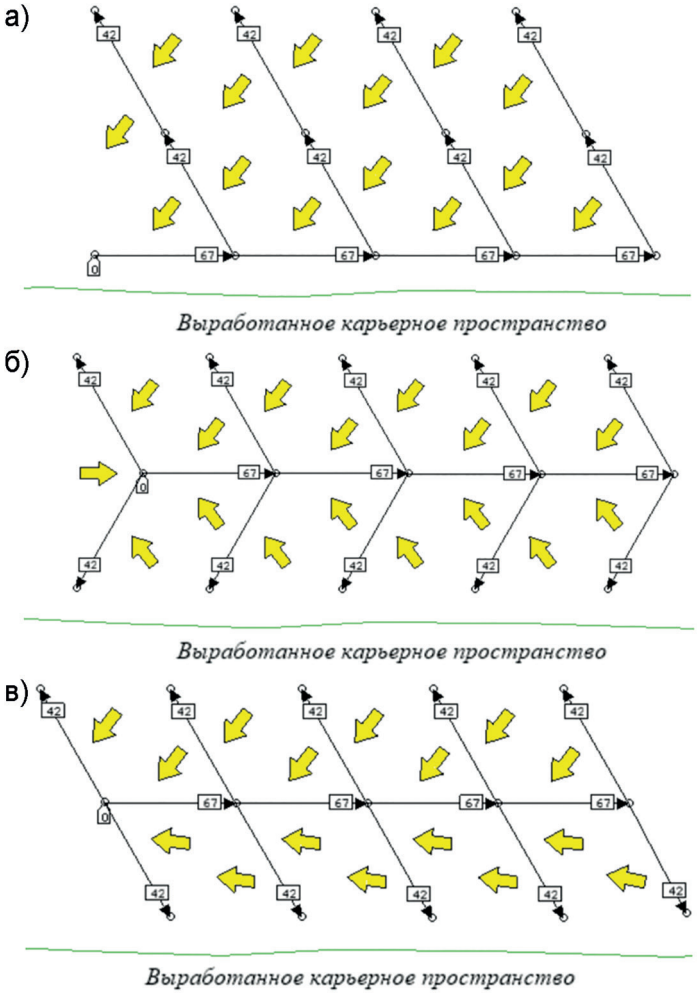

Рис. 3. Типовые схемы взрывания на исследуемых блоках: диагональная (а); врубовая (б); поперечно-врубовая (в)

Fig. 3. Standard blast designs in the test blocks: diagonal design (a); cut blast (b); crosswise cut blast (v)

ного пространства до и после взрыва, и результаты их наложения. Основным фактором расхождения положений объекта до (черная линия) и после (голубая линия) взрыва ниже горизонта 365 является непосредственно формирование насыпи в результате сброса породы. С учетом того, что аэрофотосъемка выполнена на равных высотах, в условиях отсутствия на данных участках наземных контрольных точек с увеличением расстояния по вертикали от положения камеры при фотографировании происходит слабопрогнозируемое снижение точности и достоверности получаемой модели, что не позволяет осуществить с приемлемой точностью подсчет объемов сброса.

Полевые измерения выполнялись методом беспилотной фотограмметрии с применением наземных опорных точек, представленных контрастными равномерно распределенными по объекту съемки крестами в количестве не менее пяти

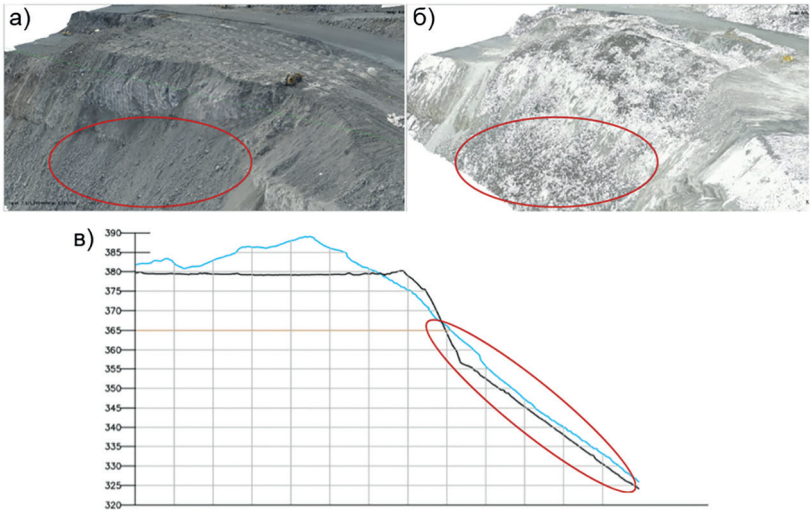

Рис. 4. Цифровая модель рельефа поверхностей до и после взрыва, блок № 1: модель объекта до взрывания (а); модель объекта после взрывания (б); поперечный разрез объекта (в)

Fig. 4. Digital model of surface before and after the explosion, block no. 1: model of the object before the explosion (a); model of the object after the explosion (b); cross-section of the object (v)

на каждый блок в зависимости от его габаритов. Координирование опорных точек выполнено посредством спутниковой маркшейдерской аппаратуры, работавшей в режиме статики, обеспечивающей миллиметровую точность определения координат. Кроме того, для повышения качества взаимного ориентирования при помощи бортового спутникового приемника БЛА и встроенных инерциальных блоков с навигационной точностью фиксировались пространственные положения центров снимков, углы курса и тангажа камеры. При выполнении съемки высота полета и характеристики применяемой камеры обеспечивали величину размеров пикселя на местности не более 40 мм.

На первом этапе обработки фотоснимков выполнялся пересчет координат центров фотографирования в локальную систему координат объекта и ручное дешифрирование наземных опорных точек. Последующие этапы, представленные взаимным и внешним ориентированием снимков, формированием облака точек высокой плотности (сопоставимой с величинами пикселей фотоснимка на поверхности объекта), построением плоской цифровой модели местности и ортофотоплана, выполнены автоматизированно с применением ПО Agisoft Metashape в режимах, не предусматривающих обрезку и потерю качества исходного материала [34, 35].

Построение поверхностей для последующих математических операций выполнено путем формирования TIN по точкам облака, полученного в результате обработки фотограмметрических данных. Фильтрация и иные вмешательства в набор исходных данных не требовались, за исключением ручного и автоматизированного удаления людей и техники, ввиду благоприятных условий освещенности, наличия яркой многоцветной текстуры поверхности на всех рассматриваемых объектах съемки. Вычисление объема сброса выполнено посредством сравнения поверхностей в программной среде AutoDesk. При первичных расчетах выполнен подсчет объема

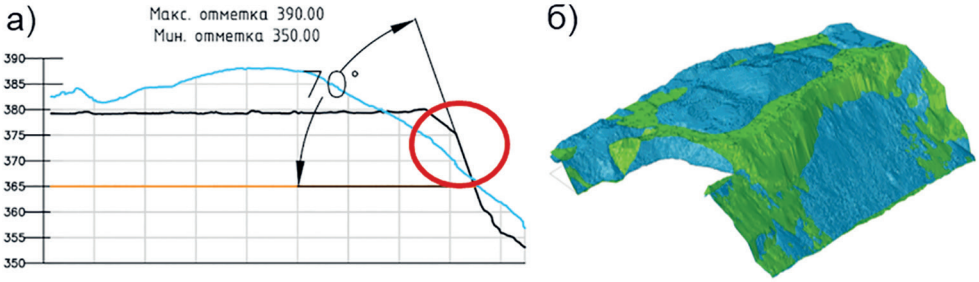

Рис. 5. Геометрия до и после взрыва по разрезу, блок № 1 (разрез (а) и модель (б): зеленым — положение блока до взрыва, голубым — положение блока после взрыва)

Fig. 5. Geometry before and after the explosion along the section, block No. 1: section (a) and model (b): green position of the block before the explosion, blue position of the block after the explosion

между поверхностями после взрыва и до взрыва в пределах контура призмы сбрасываемого объема, представленного линией пересечения поверхностей до и после взрыва в районе участка сброса (см. рис. 3, 4).

Обсуждение

В работе проведен анализ смещения (сброса) ВГМ на пяти характерных массовых взрывах в выработанное пространство карьера и двух массовых взрывах — на рабочую площадку уступа. Во всех случаях вскрышные блоки взрывались на свободную поверхность откоса уступа.

На примере блока № 1 рассмотрим подход к анализу параметров сброса ВГМ в выработанное карьерное пространство. Рассматриваемый блок до взрывания характеризуется сравнительно крутым (около 70°) углом откоса, который впоследствии был значительно выположен взрывом. Верхняя бровка уступа при взрывании была полностью сброшена (рис. 5).

Объем сброшенной ВГМ в данном случае может быть достоверно определен как объем, заключенный между поверхностью до и после взрыва в пределах контура пересечения одноименных поверхностей.

В результате расчета в ПО Civil 3D был получен объем 23 700 м^3, что составляет 10% от общего объема блока по проекту. Поскольку длина сбрасываемой части блока составляет 180 м, то величина сброса с каждого метра длины составляет порядка 130 м^3/м.

Аналогичным образом изучены блоки № 2 — 5. Отмечается, что пологая форма блоков после взрыва наблюдается не во всех случаях, угол откоса после взрыва косвенно зависит от схемы и объема взрывания и геометрических характеристик блока.

При этом важно отметить, что сброс также присутствует в блоках, не характеризующихся крутым углом откоса до взрыва и пологим откосом после взрыва, откуда следует очевидный вывод о том, что общий объем сброса по любому блоку не может быть однозначно определен как разность между двумя указанными поверхностями, — данная величина, даже найденная с высокой точностью, является лишь частью общего объема сброса.

Для верификации оценки объемов сброса также рассмотрены блоки № 6 и 7, не имеющие открытой поверхности на выработанное пространство карьера. В данном случае интерес представляет объем развала, который косвенно может быть равным объему сброса при условии иной геометрии нижележащих уступов (объем, который был бы сброшен на нижележащие горизонты при отсутствии

Сводная информация по исследуемым блокам
Summary information on the blocks under study

№ блока	Объем блока, тыс. м³	Длина поверхности блока в направлении отработанного пространства карьера, м	Средний угол откоса поверхности блока в направлении отработанного пространства карьера, град	Схема инициирования	Интервал замедления, мс: в магистрали × по ряду	Объем сброса, тыс. м³	Объем сброса с метра длины блока, м³ / м*
1	224	180	70	врубовая (НСИ)	34×42	24	130
2	266	155	60	диагональная (ЭСИ)	136×60	15	97
3	305	150	55	поперечно-врубовая (НСИ)	67×42	15	100
4	361	285	45	врубовая (НСИ)	67×42	16	56
5	227	138	75	диагональная (НСИ)	42×109	13	94
6	210	—	80	диагональная (НСИ)	42×67	—	180
7	123	—	45	диагональная (НСИ)	42×67	—	188

должной ширины нижней площадки уступа).

На примере блока № 6 (рис. 6) наблюдается смещение ВГМ на поверхность нижележащего горизонта, что обеспечивает возможность выполнения непосредственной съемки данного участка вышеописанными методами и однозначного определения общего объема смещения, которое составляет 180 м³/м. Для данного блока выполняются следующие условия: угол откоса близок к 800, диагональная схема инициирования без дополнительного замедления первых скважин в рядах (эшелонах) относительно верхней бровки обеспечивает выброс горной массы на открытую поверхность.

Полученное значение потенциального объема сброса по блокам № 6 и 7 косвенно подтверждает хорошую сходимость результатов, полученных при обработке направленных на сброс блоков. Таким образом, значение наибольшего возможного объема сброса горной мас-

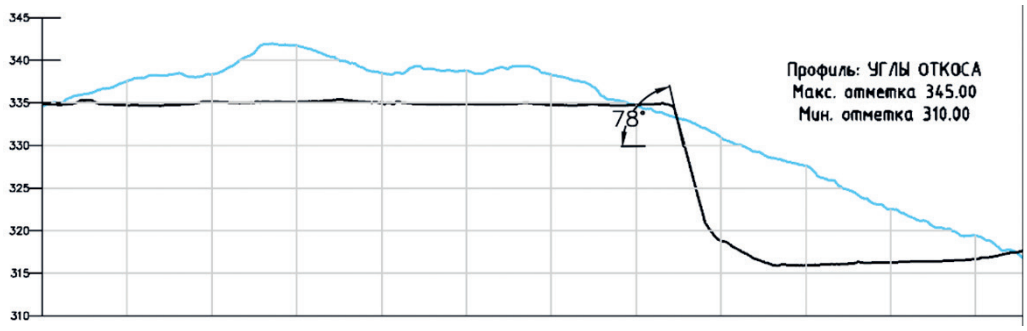

Рис. 6. Геометрия до и после взрыва по разрезу, блок № 5 (черная линия — объект до взрывания, голубая линия — объект после взрывания)

Fig. 6. Geometry before and after the explosion according to the section, block no. 5 (black line — object before explosion, blue line — object after explosion)

сы в выработанное пространство для условий исследуемого карьера можно принимать в 180 м^3/м.

Результаты исследования

Сводная информация по результатам оценки сброса ВГМ по исследуемым блокам представлена далее в табличном виде (таблица).

Помимо очевидных факторов, связанных с характеристиками непосредственно взрывания, объем пород, сброшенных на нижележащие горизонты, связан с геометрическими характеристиками взрываемого блока. При отсутствии горизонтальной площадки по нижней бровки блока основными геометрическими факторами являются: длина бровки уступа, высота уступа и угол откоса уступа.

Выводы

Выполнены расчеты величин сброса ВГМ для различных условий с точки зрения объема и площади взрываемого блока, его геометрических характеристик и схемы инициирования. Единственной практически неизменной величиной являлась высота блока, что позволяет сделать для данного параметра в условиях рассматриваемого объекта ряд заключений:

1. Инструментальный контроль объема сброса при помощи БЛА для блоков, расположенных рядом с отработанным пространством карьера, малоэффективен ввиду большой высоты сброса и, как следствие, большой площади разброса породы. Для исследования и подбора оптимальных схем БВР на таких участках с учетом специфики горных работ и формируемого выработанного пространства карьера требуется разработка методик измерений и учета объемов сброса ВГМ.

2. Значительное влияние на величину сброса оказывает величина угла откоса уступа (при углах откоса более 60º вероятно существенное нарастание величины сброса) и угла откоса после выполаживания взрывом. Из анализа данных обработанных блоков показано, что вторая величина зависит от множества факторов, некоторые из них можно отнести к случайным; и в ряде случаев при сравнительно небольших величинах угла откоса (менее 50º) величина угла откоса после взрыва совпадает с величиной угла до взрыва, что, с одной стороны, свидетельствует о малой величине сброса, а с другой стороны — сильно затрудняет определение ее точного значения.

3. При оценке величин сброса с точки зрения влияния длины бровки уступа возможно использование такого параметра, как объем сброса на 1 м длины по верхней бровке уступа. Ввиду того, что общий объем сброса зависит от множества факторов (зачастую случайных), а его истинная величина не может быть определена из-за несовершенства существующих методик измерения, данная величина рассчитывается на основе объема, заключенного между поверхностями блока до и после взрыва в районе области сброса и обладает наибольшей степенью соответствия реальной величине сброса при больших углах откоса. Для уступов со сравнительно большими углами откоса данное значение колеблется в пределах 90—130 м^3/м; при меньших углах откоса — значительно уменьшается, при этом уменьшается и точность определения данного значения.

4. В формировании сброса участвуют преимущественно скважины 1-го и 2-го рядов, пробуренные параллельно верхней бровке уступа; при этом, как показали исследования, в случае применения увеличенных интервалов замедлений для этих рядов с направлением действия взрыва в противоположную сторону от выработанного пространст-

ва объем сброса существенно уменьшается и составляет 50—90 м³/м. Для минимизации сброса ВГМ в выработанное пространство карьера целесообразно применение электронных систем инициирования, которые позволяют более гибко управлять замедлениями при проектировании схем взрывания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Арсентьев А. И.*, *Холодняков Г. А.* Проектирование горных работ при открытой разработке месторождений. — М.: Недра, 1994. — 336 с.

2. *Холодняков Г. А.* Проектирование карьеров при разработке комплексных месторождений. — СПб., 2013. — 192 с.

3. *Fomin S. I.*, *Ivanov V. V.*, *Semenov A. S.*, *Ovsyannikov M. P.* Incremental open-pit mining of steeply dipping ore deposits // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020, vol. 11, no. 15, pp. 1306—1311.

4. *Kosolapov A. I.*, *Ptashnik Y. P.*, *Ptashnik A. I.* Influence of the parameters of the openings on the efficiency of open-pit mining // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020, vol. 539, no. 1, article 012156. DOI: 10.1088/1755-1315/539/1/012156.

5. *Фомин С. И.* Особенности технологи открытой разработки крутопадающих рудных месторождений этапами // Маркшейдерия и недропользование. — 2020. — № 1. — С. 41—44.

6. *Yakovlev V. L.*, *Glebov A. V.*, *Bersenyov V. A.*, *Kulniyaz S. S.*, *Ligotskiy D. N.* Influence of an installation angle of the conveyor lift on the volumes of mining and preparing work at quarries at the cyclic-flow technology of ore mining // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences. 2020, vol. 4, no. 442, pp. 127—137. DOI: 10.32014/2020.2518-170X.93.

7. *Скорик Л. Ф.*, *Карпов В. А.*, *Тимофеев И. Н.*, *Пташник А. И.* Технология добычных работ на месторождениях компании «Полюс Красноярск» // Горный журнал. — 2020. — № 10. — С. 30—33. DOI: 10.17580/gzh.2020.10.01.

8. *Loginov E.*, *Ligotsky D.*, *Argimbaev K.* Averaging the operating stripping ratio for sinking mining systems based on mathematical simulation // Journal of Physics: Conference Series. 2020, vol. 1614, no. 1, article 012050. DOI: 10.1088/1742-6596/1614/1/012050.

9. *Kuznetsov D. V.*, *Kosolapov A. I.* Research of the influence of the excavating and automotive equipment complexes parameters on the speed of faces advance // Earth and Environmental Science. 2021, vol. 626, no. 1, article 012020. DOI: 10.1088/1755-1315/626/1/012020.

10. *Read J.*, *Stacey P.* Guidelines for open pit slope design. Collingwood, CSIRO Publishing, 2009, 487 p.

11. *Кузнецов Д. В.* Обоснование условий применения технологических комплексов для разработки рудных месторождений в суровых климатических условиях // Известия вузов. Горный журнал. — 2015. — № 2. — С. 4—11.

12. *Tyuleneva T. A.*, *Loginov E. V.*, *Moldazhanov M. B.*, *Plotnikov E. A.* Improving the efficiency of using hydraulic reverse shovel excavators on inclined and steeply dipping fields by controlling the overburden rate // E3S Web of Conferences. 2021, vol. 278, article 01011. DOI: 10.1051/e3sconf/202127801011.

13. *Marinina O. A.*, *Kirsanova N. Y.*, *Nevskaya M. A.* Curcular economy models in industry: developing a conceptual framework // Energies. 2022, vol. 15, pp. 9376—9386. DOI: 10.3390/en15249376.

14. *Рахманов Р. А.*, *Лоеб Д.*, *Косухин Н. И.* Оценка смещений рудных контуров после взрыва с применением ВММ-системы // Записки Горного института. — 2020. — Т. 245. — С. 547—553. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.6.

15. *Яницкий Е. Б.*, *Кабелко С. Г.*, *Дунаев В. А.*, *Рахманов Р. А.* Компьютерное моделирование смещения горной массы и оценка разубоживания руды в результате массового взрыва при открытой разработке месторождений // Взрывное дело. — 2018. — № 120/77. — С. 94—108.

16. *Tokarenko A.*, *Timofeyev I.*, *Kilin S.*, *Valery W.*, *Valle R.*, *Duffy K.* Increasing production at polyus gold Blagodatnoye with holistic optimization from mine-to-plant / Procemin 2017: 13th International Mineral Processing Conference. Chile, 2017, pp. 1—9.

17. *Виноградов Ю. И.*, *Хохлов С. В.*, *Зигангиров Р. Р.*, *Рахманов Р. А.* К вопросу проектирования буровзрывных работ на месторождениях со сложным геологическим строением на примере Куранахского рудного поля // Взрывное дело. — 2022. — № 137/94. — С. 45—65.

18. *Тюпин В. Н.*, *Игнатенко И. М.*, *Агарков И. Б.*, *Крючков И. С.* Автоматизированный расчет параметров взрывных работ на основе показателя буримости трещиноватого массива при шарошечном бурении скважин на карьерах // Горный журнал. — 2021. — № 12. — С. 75—79. DOI: 10.17580/gzh.2021.12.14.

19. *Афанасьев П. И.* Анализ параметров ударных волн на стенке взрывной полости при преломлении детонационных волн через воздушную и водную среду // Устойчивое развитие горных территорий. — 2023. — Т. 15. — № 3 (57). — С. 505—515. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-3-505-515.

20. *Игнатенко И. М.*, *Дунаев В. А.*, *Тюпин В. Н.* Совершенствование методики предпроектной оценки взрываемости массивов скальных горных пород в карьерах // Горный журнал. — 2019. — № 1. — С. 46—50. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.10.

21. *Isheyskiy V., Martinyskin E., Smirnov S., Vasilyev A., Knyazev K., Fatyanov T.* Specics of MWD data collection and verication during formation of training datasets // Minerals. 2021, vol. 11, no. 8, article 798. DOI: 10.3390/min11080798.

22. *Аленичев И. А.*, *Рахманов Р. А.* Исследование эмпирических закономерностей сброса горной массы взрывом на свободную поверхность уступа карьера // Записки Горного института. — 2021. — Т. 249. — С. 334—341. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.2.

23. *Васильев Б. Ю.*, *Мустафин М. Г.* Анализ и оптимизация цифровых моделей рельефа горнопромышленного объекта с открытым типом разработки // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 9. — С. 141—159. DOI: 10. 25018/0236_1493_2023_9_0_141.

24. *Bamford T., Medinac F., Esmaeili K.* Continuous monitoring and improvement of the blasting process in open pit mines using unmanned aerial vehicle techniques // Remote Sensing. 2020, vol. 12 no. 17, article 2801. DOI: 10.3390/rs12172801.

25. *Ишейский В. А.*, *Мартынушкин Е. А.*, *Васильев А. С.*, *Смирнов С. А.* Особенности сбора данных в процессе бурения взрывных скважин для формирования геоструктурных блочных моделей // Устойчивое развитие горных территорий. — 2021. — Т. 13. — № 4 (50). — С. 608—619. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-4-608-619.

26. *Выстрчил М. Г.*, *Гусев В. Н.*, *Сухов А. К.* Методика определения погрешностей сегментированных GRID моделей открытых горных выработок, построенных по результатам аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна // Записки Горного института. — 2023. — Т. 262. — С. 562—570.

27. *Зеньков И. В.*, *Чинь Ле Хунг*, *Сычева Е. М.*, *Вокин В. Н.*, *Кирюшина Е. В.*, *Черепанов Е. В.*, *Герасимова Е. И.*, *Штреслер К. А.*, *Новоженин С. Ю.* Исследование динамики работы топливно-энергетического комплекса в штате Южная Австралия с использованием данных спутниковой съемки // Уголь. — 2023. — № 10. — С. 109—112. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-10-109-112.

28. *Жуликов В. В.*, *Князев К. А.*, *Назаров С. С.* Обоснование эффективности взрывных работ с использованием электронных систем в сравнении с неэлектрическими средствами инициирования // Горная промышленность. — 2022. — № 5. — С. 64—68. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-5-64-68.

29. *Должиков В. В.*, *Рядинский Д. Э.*, *Яковлев А. А.* Влияние интервалов замедления на амплитуды волн напряжений при изучении модели взрыва системы скважинных зарядов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6-2. — С. 18—32. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_18.

30. *Зицик А. А.*, *Боголюбова А. А.*, *Романчиков А. Ю.* Прикладное использование фотограмметрического метода получения данных о натурных измерениях при проведении обмеров нежилого помещения / Инженерные системы и городское хозяйство. Сборник материалов научных трудов. — СПб., 2020. — С. 160—169.

31. *Вальков В. А.*, *Виноградов К. П.*, *Валькова Е. О.*, *Мустафин М. Г.* Создание растров высокой информативности по данным лазерного сканирования и аэрофотосъемки // Геодезия и картография. — 2022. — Т. 83. — № 11. — С. 40—49. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50059848.

32. *Blischenko A. A.*, *Gusev V. N.* Anovar of errors in surveying photogrammetric measurements of mountain objects with the help of unmanned aerial vehicles // IOP Conference Series: Earth and

Environmental Science. 2021, vol. 720, no. 1, article 012103. DOI: 10.1088/1755-1315/720/1/012103. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46022051.

33. *Блищенко А. А., Гусев В. Н.* Совместное использование электронных тахеометров и GNSS-приемников для маркшейдерских съемок на карьерах // Естественные и технические науки. — 2019. — № 4 (130). — С. 79—81. https://www.elibrary.ref.ru/item.asp?id=37530190.

34. *Vystrchil M. G., Sukhov A. K., Novozhenin S. U., Popov A. V., Guba S. A.* Quality analysis of digital photogrammetric models obtained in low light conditions // Journal of Physics: Conference Series. 2020, vol. 1661, no. 1, article 012089. DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012089.

35. *Vystrchil M., Sukhov A., Rybakov A., Chura M., Artemova G.* Quality analysis of voxel models obtained with remote sensing // E3S Web of Conferences. 2023, vol. 378, article 04002. DOI: 10.1051/e3sconf/202337804002. ГИАБ

REFERENCES

1. Arsent'ev A. I., Kpolodnyakov G. A. *Proektirovanie gornykh rabot pri otkrytoy razrabotke mestorozhdeniy* [Open-cast mining design], Moscow, Nedra, 1994, 336 p.

2. Kholodnyakov G. A. *Proektirovanie kar'erov pri razrabotke kompleksnykh mestorozhdeniy* [Design of quarries for the development of complex deposits], Saint-Petersburg, 2013, 192 p.

3. Fomin S. I., Ivanov V. V., Semenov A. S., Ovsyannikov M. P. Incremental open-pit mining of steeply dipping ore deposits. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020, vol. 11, no. 15, pp. 1306—1311.

4. Kosolapov A. I., Ptashnik Y. P., Ptashnik A. I. Influence of the parameters of the openings on the efficiency of open-pit mining. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020, vol. 539, no. 1, article 012156. DOI: 10.1088/1755-1315/539/1/012156.

5. Fomin S. I. Features of technology for open-pit mining of steeply dipping ore deposits in stages. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2020, no. 1, pp. 41—44. [In Russ].

6. Yakovlev V. L., Glebov A. V., Bersenyov V. A., Kulniyaz S. S., Ligotskiy D. N. Influence of an installation angle of the conveyor lift on the volumes of mining and preparing work at quarries at the cyclic-flow technology of ore mining. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*. 2020, vol. 4, no. 442, pp. 127—137. DOI: 10.32014/2020.2518-170X.93.

7. Skorik L. F., Karpov V. A., Timofeev I. N., Ptashnik A. I. Mining technologies at Polyus Krasnoyarsk. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 10, pp. 30—33. DOI: 10.17580/gzh.2020.10.01. [In Russ].

8. Loginov E., Ligotsky D., Argimbaev K. Averaging the operating stripping ratio for sinking mining systems based on mathematical simulation. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, vol. 1614, no. 1, article 012050. DOI: 10.1088/1742-6596/1614/1/012050.

9. Kuznetsov D. V., Kosolapov A. I. Research of the influence of the excavating and automotive equipment complexes parameters on the speed of faces advance. *Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 626, no. 1, article 012020. DOI: 10.1088/1755-1315/626/1/012020.

10. Read J., Stacey P. *Guidelines for open pit slope design*. Collingwood, CSIRO Publishing, 2009, 487 p.

11. Kosolapov A. I., Malofeev D. E., Kuznetsov D. V. Justification of application of technological complexes for development of ore mining deposits in harsh weather conditions. *Minerals and Mining Engineering*. 2015, no. 2, pp. 4—11. [In Russ].

12. Tyuleneva T. A., Loginov E. V., Moldazhanov M. B., Plotnikov E. A. Improving the efficiency of using hydraulic reverse shovel excavators on inclined and steeply dipping fields by controlling the overburden rate. *E3S Web of Conferences*. 2021, vol. 278, article 01011. DOI: 10.1051/e3sconf/202127801011.

13. Marinina O. A., Kirsanova N. Y., Nevskaya M. A. Curcular economy models in industry: developing a conceptual framework. *Energies*. 2022, vol. 15, pp. 9376—9386. DOI: 10.3390/en15249376.

14. Rakhmanov R. A., Loeb D., Kosukhin N. I. Estimation of ore contourmovements after the blast using the BMM system. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 245, pp. 547—553. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.6.

15. Yanitsky E. B., Kabelko S. G., Dunaev V. A., Rakhmanov R. A. Computer modeling of rock mass displacement and assessment of ore dilution as a result of a massive explosion during open-pit mining. *Explosion technology*. 2018, no. 120/77, pp. 94—108. [In Russ].

16. Tokarenko A., Timofeyev I., Kilin S., Valery W., Valle R., Duffy K. Increasing production at polyus gold Blagodatnoye with holistic optimization from mine-to-plant. *Procemin 2017: 13th International Mineral Processing Conference*. Chile, 2017, pp. 1 — 9.

17. Vinogradov Yu. I., Khokhlov S. V., Zigangirov R. R., Rakhmanov R. A. On the issue of designing drilling and blasting operations in deposits with a complex geological structure using the example of the Kuranakh ore field. *Explosion technology*. 2022, no. 137/94, pp. 45 — 65. [In Russ].

18. Tyupin V. N., Ignatenko I. M., Agarkov I. B., Kryuchkov I. S. Computerized design of blasting parameters based on drillability index of jointed rock mass in roller bit drilling in open pit mines. *Gornyi Zhurnal*. 2021, no. 12, pp. 75 — 79. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2021.12.14.

19. Afanasyev P. I. Analysis of shock wave parameters at the explosive cavity wall during refraction of detonation waves through the air and water. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, vol. 15, no. 3 (57), pp. 505 — 515. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-3-505-515.

20. Ignatenko I. M., Dunaev V. A., Tyupin V. N. Improving procedure of pre-project assessment of hard rock blastability in open pit mines. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no. 1, pp. 46 — 50. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.10.

21. Isheyskiy V., Martinyskin E., Smirnov S., Vasilyev A., Knyazev K., Fatyanov T. Specics of MWD data collection and verication during formation of training datasets. *Minerals*. 2021, vol. 11, no. 8, article 798. DOI: 10.3390/min11080798.

22. Alenichev I. A., Rakhmanov R. A. Empirical regularities investigation of rock mass discharge by explosion on the free surface of a pit bench. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 249, pp. 334 — 341. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.2.

23. Vasilev B. Yu., Mustafin M.G. Digital relief models of open-pit mining facilities: Analysis and optimization. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 9, pp. 141 — 159. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_9_0_141.

24. Bamford T., Medinac F., Esmaeili K. Continuous monitoring and improvement of the blasting process in open pit mines using unmanned aerial vehicle techniques. *Remote Sensing*. 2020, vol. 12 no. 17, article 2801. DOI: 10.3390/rs12172801.

25. Isheisky V. A., Martynushkin E. A., Vasiliev A. S., Smirnov S. A. Data collection features of during the blast wells drilling for the formation of geostructural block models. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021, vol. 13, no. 4 (50), pp. 608 — 619. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-4-608-619.

26. Vystrchil M. G., Gusev V. N., Sukhov A. K. A method of determining the errors of segmented GRID models of open-pit mines constructed with the results of unmanned aerial photogrammetric survey. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 262, pp. 562 — 570. [In Russ].

27. Zenkov I. V., Trinh Le Hung, Sycheva E. M., Vokin V. N., Kiryushina E. V., Cherepanov E. V., Gerasimova E. I., Shtresler K. A. & Novozhenin S. U. A study of the operational dynamics of the fuel and energy complex in the State of South Australia using satellite imaging data. *Ugol'*. 2023, no. 10, pp. 109 — 112. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-10-109-112.

28. Zhulikov V. V., Knyazev K. A., Nazarov S. S. Justification of blasting efficiency using electronic systems in comparison with non-electric primers. *Russian Mining Industry Journal*. 2022, no. 5, pp. 64 — 68. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-5-64-68.

29. Dolzhikov V. V., Ryadinsky D. E., Yakovlev A. A. Influence of deceleration intervals on the amplitudes of stress waves during the explosion of a system of borehole charges. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-2, pp. 18 — 32. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_18.

30. Zitsik A. A., Bogolyubova A. A., Romanchikov A. Yu. Application of the photogrammetric method for obtaining data on full-scale measurements during measurements of non-residential premises. *Inzhenernye sistemy i gorodskoe khozyaystvo. Sbornik materialov nauchnykh trudov* [Engineering systems and urban economy. Collection of materials of scientific works], Saint-Petersburg, 2020, pp. 160 — 169. [In Russ].

31. Valkov V. A., Vinogradov K. P., Valkova E. O., Mustafin M. G. Creating highly informative rasters based on laser scanning and aerial photography data. *Geodesy and cartography*. 2022, vol. 83, no. 11, pp. 40 — 49. [In Russ]. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50059848.

32. Blischenko A. A., Gusev V. N. Anovar of errors in surveying photogrammetric measurements of mountain objects with the help of unmanned aerial vehicles. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 720, no. 1, article 012103. DOI: 10.1088/1755-1315/720/1/012103. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46022051.

33. Blischenko A. A., Gusev V. N. The cooperative usage of electronic tachometers and gnss-receivers for surveying surveys of quarries. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2019, no. 4 (130), pp. 79—81. [In Russ]. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37530190.

34. Vystrchil M. G., Sukhov A. K., Novozhenin S. U., Popov A. V., Guba S. A. Quality analysis of digital photogrammetric models obtained in low light conditions. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, vol. 1661, no. 1, article 012089. DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012089.

35. Vystrchil M., Sukhov A., Rybakov A., Chura M., Artemova G. Quality analysis of voxel models obtained with remote sensing. *E3S Web of Conferences*. 2023, vol. 378, article 04002. DOI: 10.1051/e3sconf/202337804002.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Маринин Михаил Анатольевич[1] — канд. техн. наук,
зав. кафедрой, e-mail: Marinin_MA@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-5575-9343,
Илюхин Дмитрий Александрович[1] — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: Ilyukhin_DA@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-8469-334X,
Рахманов Руслан Азаматович — канд. техн. наук,
научный сотрудник, Институт проблем комплексного
освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН,
e-mail: ipkon-dir@ipkonran.ru,
ORCID ID: 0000-0002-5341-2274,
Аленичев Игорь Алексеевич — канд. техн. наук,
ООО «УК Полюс», e-mail: info@polyus.com,
ORCID ID: 0000-0003-3359-4450,
[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.
Для контактов: Илюхин Д.А., e-mail: Ilyukhin_DA@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M.A. Marinin[1], Cand. Sci. (Eng.), Head of Chair,
e-mail: Marinin_MA@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-5575-9343,
D.A. Ilyukhin[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: Ilyukhin_DA@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-8469-334X,
R.A. Rakhmanov, Cand. Sci. (Eng.),
Researcher, Institute of Comprehensive Exploitation
of Mineral Resources Russian Academy of Sciences,
111020, Moscow, Russia,
e-mail: ipkon-dir@ipkonran.ru,
ORCID ID: 0000-0002-5341-2274,
I.A. Alenichev, Cand. Sci. (Eng.),
UK Polyus, 123056, Moscow, Russia,
e-mail: info@polyus.com,
ORCID ID: 0000-0003-3359-4450,
[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.
Corresponding author: D.A. Ilyukhin, e-mail: Ilyukhin_DA@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 29.03.2024; получена после рецензии 06.06.2024; принята к печати 10.12.2024.
Received by the editors 29.03.2024; received after the review 06.06.2024; accepted for printing 10.12.2024.