



1921-2021

кафедре маркшейдерского дела
Уральского государственного
горного университета

**МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ИСКУССТВО, ГЕОМЕТРИЯ НЕДР
И ГОРНАЯ ГЕОМЕХАНИКА - 100 ЛЕТ НА „СЕДОМ“ УРАЛЕ**

МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ИСКУССТВО, ГЕОМЕТРИЯ НЕДР И ГОРНАЯ ГЕОМЕХАНИКА - 100 ЛЕТ НА „СЕДОМ“ УРАЛЕ

Сборник научных статей

Екатеринбург - 2021

4. *Временные методические указания по управлению устойчивостью бортов карьеров цветной металлургии*: утв. Министерством металлургии СССР 14.01.88. М.: Унипромедь, 1989. 128 с.

5. *Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости*. Л.: ВНИМИ, 1987. 118 с.

6. *Инструкция по расчету устойчивости бортов разрезов при их ликвидации и обеспечению сохранности прилегающих к разрезам территорий*: утв. Министерством угольной промышленности СССР 17.01.1977. Л.: ВНИМИ, 1977. 55 с.

УДК 622.023, 528.715

ИЗУЧЕНИЕ ТРЕЩИНОВАТОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ОСНОВЕ АЭРОФОТОСЪЁМКИ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ УСТОЙЧИВЫХ УСТУПОВ

Б. Т. Ильясов, кандидат технических наук,
заведующий лабораторией устойчивости бортов карьеров
Уральского филиала Научно-исследовательского института
горной геомеханики и маркшейдерского дела (ВНИМИ);

И. А. Гузеев, старший научный сотрудник
лаборатории устойчивости бортов карьеров
Уральского филиала Научно-исследовательского института
горной геомеханики и маркшейдерского дела (ВНИМИ)

В международной практике при проектировании уступов принято обязательно учитывать углы и азимуты трещин. Точность районирования месторождения по параметрам трещиноватости, так же как и методы их определения, зависит от стадии изучения месторождения. Среди прочих способов изучения параметров трещин на этапе разработки месторождения наиболее простым и точным способом является съёмка трещиноватости на обнажениях горных пород (на откосах уступов). Параметры уступов далее могут определяться вероятностными расчётами, кинематическим анализом, расчётами устойчивости методом предельного равновесия или численным моделированием в зависимости от прогнозируемого механизма обрушения уступа и объёма имеющихся данных о трещиноватости [1].

Данный подход в сочетании с современными техниками съёмки трещиноватости опробован специалистами Уральского филиала ВНИМИ на карьерах Оленегорского железорудного района.

Изучение трещиноватости

В качестве инструментов для изучения пространственных характеристик трещин на обнажениях горных пород сегодня чаще всего используются горные компасы, реже специализированное оборудование для фотограмметрической съёмки. Эти инструменты позволяют изучить трещиноватость локализованно на откосах, к которым есть безопасный доступ для человека, осуществляющего съёмку. При применении горных компасов съёмка трещин на откосе выполняется лишь на высоту человеческого роста. Ещё одним недостатком горных компасов является невозможность работы на месторождениях с магнитной аномалией.

В связи с этим при выполнении исследований на карьерах «Комсомольский», «Оленегорский» и «Кировогорский» Оленегорского железорудного района специалистами Уральского филиала ВНИМИ использован комбинированный способ съёмки, заключающийся в совместном использовании гироскопического трещиномера и беспилотных летательных аппаратов.

Гироскопический трещиномер ГТ-3 производства компании ВИОГЕМ совмещает в себе гироскопический компас, на который не оказывают воздействия магнитные помехи, и аналоговый инклинометр. Пузырьковые уровни в двух осях позволяют установить прибор в горизонтальное положение во время измерения. Ориентирование прибора производится с использованием GPS оборудования.

Для производства аэрофотосъёмки применялся беспилотный аэрофото-съёмочный комплекс «Геоскан-401» производства ГК «Геоскан». Продольное и поперечное перекрытие устанавливалось соответственно 90 % и 70 %. Всего за период проведения аэрофотосъёмочных работ выполнено 33 полета и более 58 000 снимков общим объемом 610 Гб. Средняя высота полета составляла 65 метров для получения разрешения аэрофотоснимков <1 см/пиксель.

Камеральная (фотограмметрическая) обработка материалов аэрофото-съёмки выполнена в специализированном программном обеспечении Agisoft Metashape Professional (64 bit). По итогам обработки созданы тайловые модели карьеров. Тайловая модель представляет собой триангуляционную сетку заданной плотности с наложенной на нее текстурой, преобразованной из исходных фотографий.

Полученные таким образом фотореалистичные модели, фрагмент одной из которых представлен на рис. 1, достаточно подробны для того, чтобы оконтурить на них трещины, тектонические нарушения, осыпи, участки дренирования подземных вод и другие геомеханические особенности массива.

В рамках данной работы для съёмки с тайловых моделей карьеров структурно-геологических элементов использована компьютерная программа «Sputnik», разработанная ГК «Геоскан».

Для определения азимута и угла падения трещин необходимо нанести на стенки трещины не менее трех точек. Из координат полученной группы точек рассчитывают угол и азимут падения трещины. Аналогично аппроксимируя

облако точек, выделенное на тектоническом нарушении, находятся его параметры. На рис. 1 отрезками красного цвета показан пример выделения плоскости трещины для определения её пространственных параметров.

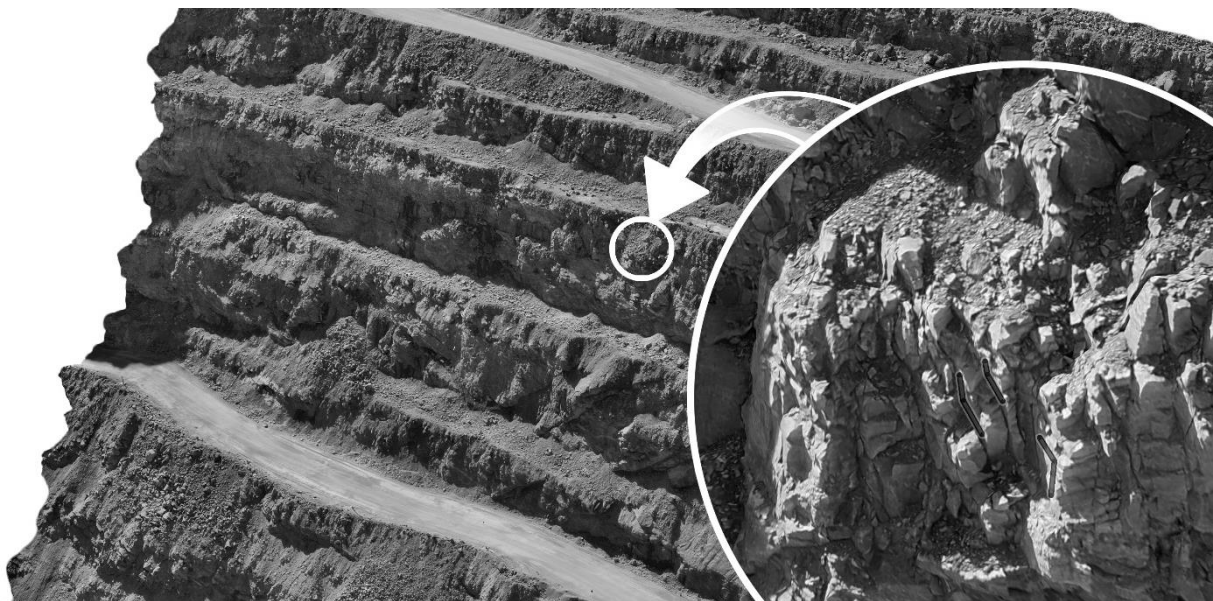


Рис. 1. Пример детализации трёхмерной модели карьера

Построение круговых диаграмм трещиноватости по итогам двух видов съёмок показало, что съёмка трещин с использованием дрона избавляет от шума при структурно-геологическом районировании, то есть от переоценки влияния локальных систем трещин, распространенных на какой-то отдельной точке съёмки.

Отображая измерения азимутов и углов падения трещин на объемной модели (как на рис. 2), можно увидеть границы структурно-геологических районов (структурных доменов). Из рис. 2 также можно увидеть, что съёмка дроном обеспечивает хорошее покрытие площади карьера структурно-геологической съёмкой, избавляя от «белых пятен» при районировании карьера.

Чтобы определить размеры блока ненарушенной породы, на тайловой модели отстраивают нормаль между двумя плоскостями трещин и вычисляют ее длину.

Сортируя результаты в рамках одной системы трещин, можно оценить зависимость угла наклона трещины от глубины или изменение угла наклона в плане. Например, на Оленегорском месторождении выявлено изменение среднего угла падения основной системы трещин от 52 до 70° в направлении с северо-запада на юго-восток.

Границы распространения трещин различных систем, отстроенные по одному из исследованных карьеров, изображены на рис. 3.

В зависимости от соотношения направлений падения откоса уступа и трещин, встречающихся в нем, могут происходить разные по типу структурные обрушения уступов: плоские, клиновидные и топплинг (опрокидывание) [1]. Схемы таких обрушений показаны на рис. 4.

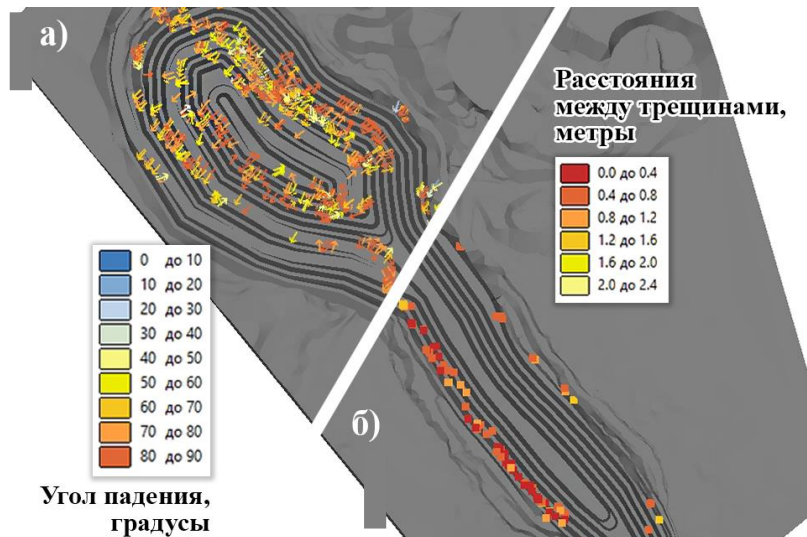


Рис. 2. Полученные аэросъёмкой: измерения угла и азимута (показан стрелками) падения трещин (а); измерения расстояний между трещинами (б)

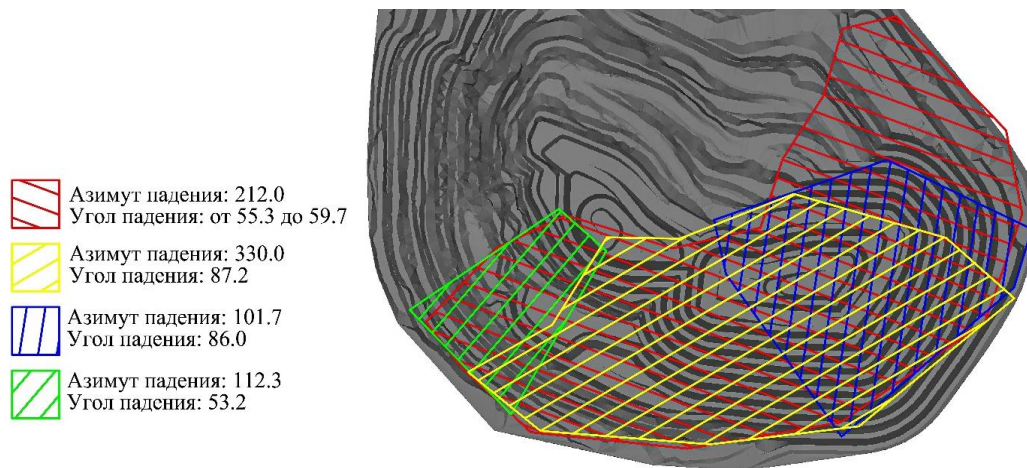


Рис. 3. Пример выделения границ распространения различных систем трещин

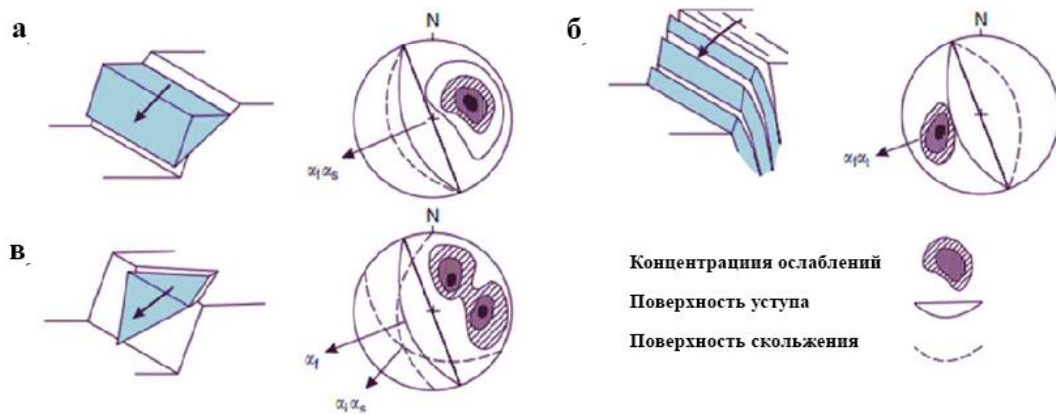


Рис. 4. Схемы обрушений уступов:

a – обрушение по плоскости; *б* – клиновидное обрушение; *в* – опрокидывание [2]

Для определения устойчивых параметров уступов для каждого потенциального механизма обрушения принимается соответствующая методика расчета.

Вероятностный расчет

Аналитически коэффициент запаса устойчивости по схеме обрушения по плоской поверхности ослабления можно вычислить по формуле:

$$n = \frac{\operatorname{tg}\varphi}{\operatorname{tg}\beta} + \frac{2C \sin \alpha}{\gamma H \sin(\alpha - \beta)},$$

где n – коэффициент запаса устойчивости; φ – угол трения по трещинам; C – сцепление по трещинам; γ – удельный вес породы; H – высота уступа; β – угол падения трещины; α – угол наклона уступа.

Сцепление по трещинам зачастую игнорируется при проведении анализа в масштабе уступа поскольку учитываются повреждения от взрывов и стремление сцепления к нулю с увеличением масштаба [3]. Тогда условием устойчивости уступа будет отсутствие трещин, подрезающих уступ под углом более угла трения по трещине.

Зная статистическое распределение трещин по углу падения можно рассчитать вероятность обрушения уступа.

В соответствии с критериями приемлемости Свона и Сепульведы, приведенными в «Руководстве по проектированию бортов карьера» [4], для уступов в конечном контуре допустимая вероятность обрушения площадки шириной 25 % от бермы составляет 30 %.

Таким образом для уступов, опасных по плоскостным обрушениям, более чем достаточно принять угол откоса таким, чтобы вероятность появления трещины, падающей под углом выше угла трения, но ниже угла откоса, была равна не более 30 %.

Для расчета угла заоткоски уступов, опасных по клиновидным обрушениям, разработана специальная компьютерная программа, которая рассчитывает параметры всех возможных линий пересечения трещин двух систем, образующих клин. Известно, что при клиновидном обрушении уступа смещение по поверхности разрушения происходит вдоль линии пересечения плоскостей трещин, образующих клин. То есть если пренебречь сцеплением, то условием устойчивости такого уступа будет падение линии пересечения под углом ниже угла трения по трещине. Таким образом вероятностный расчёт для подобных уступов выполняется так же, как и в случае уступов, опасных по обрушениям по плоскости.

Численное моделирование

В случае, когда трещины круто падают в сторону прибортового массива, существует вероятность деформации уступа в виде опрокидывания (топлинга). При этом деформация может происходить в виде опрокидывания блоков и опрокидывания слоев с изгибом.

Разница между данными двумя схемами деформирования с точки зрения их прогнозирования в том, что при опрокидывании с изгибом расчёт устойчивости по схеме Гудмана-Брея даёт некорректные результаты. Это связано с тем,

что метод Гудмана-Брея является разновидностью методов предельного равновесия и основан на допущении жесткости блоков [1].

Действительно расчёт устойчивости уступов в висячем боку месторождений по схеме Гудмана-Брея дал заниженные результаты. Коэффициент запаса устойчивости уступов Комсомольского карьера в фактическом положении составил около 0,4. По факту данные уступы находятся в устойчивом положении, не проявляя никаких признаков деформаций, кроме деформаций верхней бровки взрывом. Поэтому в международной практике такие задачи рекомендуется решать численным моделированием методами механики дискретной среды. Надо добавить, что численное моделирование методом конечных элементов тоже не позволяет решить данную задачу корректно из-за неоднородности деформированного состояния при подобном механизме разрушения уступа. В приоткосной зоне уступа образуются участки с деформациями по трещинам, превышающими критические, однако в отличие от механизма обрушения уступа по круглоцилиндрической поверхности скольжения, наличие таких деформаций при топплинге не является свидетельством возможного обрушения. Из-за этого запас устойчивости, рассчитанный конечно-элементным моделированием, получается также заниженным.

По этим причинам расчёт устойчивости уступов с обратнопадающей слоистостью выполнен методом конечно-дискретных элементов в программе Proock. Данный метод позволяет моделировать как упругопластические деформации, так и смещения по трещинам и разрывы любой величины. Подробное описание программы и метода, на котором она базируется, приводится в статье [5].

Запас устойчивости рассчитан для уступа высотой 30 м с углом откоса 75° и составил $n = 2,0$. Расчёт устойчивости выполнен по схеме снижения прочностных свойств (strength reduction method).

Механизм обрушения уступа, смоделированный при расчёте устойчивости по схеме со снижением прочностных свойств методом конечно-дискретных элементов, можно наблюдать на рис. 5.

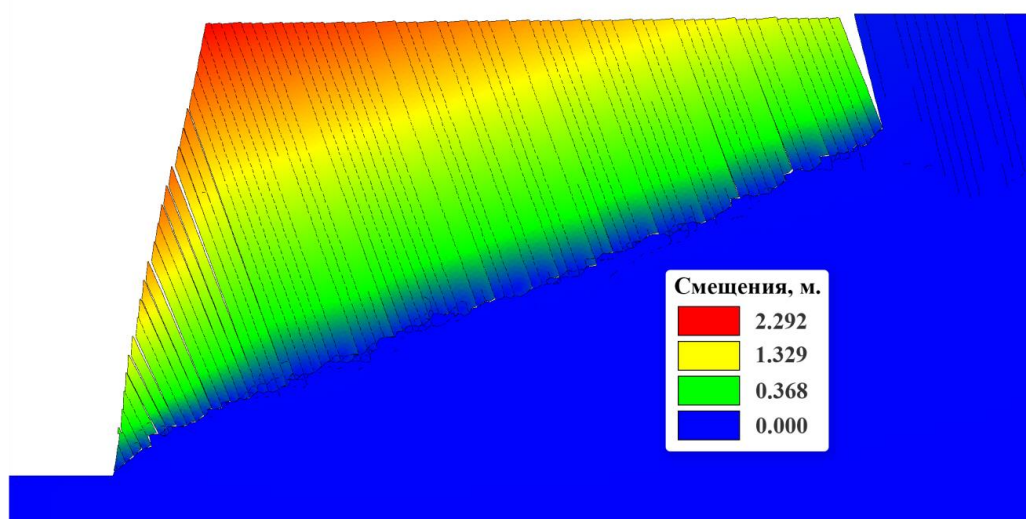


Рис. 5. Численное моделирование разрушения уступа в результате опрокидывания с изгибом

В таблице показаны параметры уступов, предложенные по итогам выполненного исследования.

Рекомендованные параметры уступов

Карьер	Борт	Формы потери устойчивости	Угол уступа, град	
			факт.	рекоменд.
Оленегорский	Юго-западный	Плоская	55-60	60
	Юго-восточный	Опрокидывание с изгибом	65	75
	Восточный	Клиновидная, опрокидывание	60	65
	Северо-восточный	Плоская	60	63
	Северная	Плоская	40-55	50
Кировогорский	Юго-западный	Плоская, опрокидывание	65	70
	Южный	Опрокидывание с изгибом	65	75
	Северо-восточный	Плоская, клиновидная	65	52
Комсомольский	Северо-восточный	Плоская, клиновидная	65	65
	Юго-западный	Опрокидывание с изгибом	65	75

Применение беспилотных летательных аппаратов показало свою эффективность для структурно-геологической съёмки. Тайловые модели, получаемые аэрофотосъёмкой, достаточно детальны для выделения и определения параметров трещин, при этом данный способ съёмки обеспечивает хорошее покрытие карьера, позволяет избавиться от «белых пятен» при районировании карьера по структурно-геологическим условиям. Также применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) позволяет производить съёмку при действии магнитной аномалии на месторождении.

Описанный способ изучения трещиноватости массива и применение описанных выше методов расчета устойчивости позволяют принять более обоснованные и различающиеся по бортам параметры уступов карьеров по сравнению с обычным подходом к проектированию карьеров.

Опыт показывает, что при отсутствии сведений о пространственных особенностях трещиноватости или при применении только классических методов расчёта устойчивости, не позволяющих в полной мере учесть эти особенности, невозможно обеспечить устойчивость уступов. Обеспечивается устойчивость лишь борта в целом. При этом в одних случаях бермы уступов и съезды уменьшаются со временем и становятся опасными для эксплуатации, а в других случаях устойчивость уступов недооценивается и борт карьера отстраивается слишком пологим.

Данный подход к определению параметров уступов позволил предложить более крутые (на величину до 8°) генеральные углы бортов карьеров Оленегорского железорудного района, обеспечив запас устойчивости бортов карьеров выше нормативного.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Руководство по проектированию бортов карьера* / под ред. Джон Рид, Питер Стейси; пер. с англ. Екатеринбург: Правовед, 2015. 544 с.
2. *Hoek E. and Bray J. W. Rock Slope Engineering. Revised 3rd Edition, The Institution of Mining and Metallurgy. London, 1981. P. 341–351.*
3. *Методика обратных расчетов сцепления и трения по трещинам по фактам вывалов с бортов карьеров* / А. Б. Макаров, Э. Хормазабаль, И. С. Ливинский, В. И. Спирин, Н.О. Солуянов // *Маркшейдерия и недропользование*. 2016. № 4. С. 44–48.
4. *Goodman R. E., Bray J. W. Toppling of rock slopes. ASCE Speciality Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes, Boulder Colorado, Vol. 2. 1976. pp. 201–234.*
5. *Ильясов Б. Т. Прогнозирование деформаций массивов горных пород с применением ПК «Prorock»* // *Проблемы недропользования*. 2018. № 1 (16). С. 39–51.

УДК 622.834.1: 622.251.7

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СООРУЖЕНИЙ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ УРАЛА

С. В. Морин, кандидат технических наук,
заведующий лабораторией сдвижения горных пород
Уральского филиала Научно-исследовательского института
горной геомеханики и маркшейдерского дела (ВНИМИ)

На месторождениях Урала актуальным является обеспечение безопасной эксплуатации зданий и сооружений, расположенных в зоне влияния горных работ, что отражено в научно-исследовательских работах Уральского филиала ВНИМИ [1–4].

Уральские месторождения характеризуются разнообразием горно-геологических и горнотехнических условий. Увеличение глубины горных работ, вовлечение в отработку запасов со сложным залеганием рудных тел, повышение требований к сохранности подрабатываемых объектов и территорий, увеличение роли технологического фактора при добыче полезного ископаемого накладывают свой отпечаток на решение вопросов сдвижения горных пород.

Разработка мероприятий по охране сооружений на промплощадках шахт, жилой и промышленной застройки от вредного влияния горных разработок производится на основе результатов инструментальных наблюдений.

Методика и результаты исследований

По результатам инструментальных наблюдений УФ ВНИМИ разработаны мероприятия по снижению степени воздействия горных работ на здания и сооружения технологического комплекса рудника на Малышевском месторождении изумрудов [1]. На месторождении наиболее актуален вопрос охраны

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Жабко А. В.</i> Кафедре маркшейдерского дела Уральского государственного горного университета – 100 лет.....	3
МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ИСКУССТВО И ГЕОМЕТРИЯ НЕДР	7
<i>Соболевский П. К.</i> Современная горная геометрия	8
<i>Соболевский П. К.</i> Маркшейдерские работы.....	45
<i>Оглоблин Д. Н.</i> Статьи по ориентировке шахт (выдержки).....	54
<i>Гальянов А. В.</i> Геометризация технологических процессов как развитие идей геометрии недр	73
<i>Патко В. А.</i> Недропользование и маркшейдерский контроль	80
ГОРНАЯ ГЕОМЕХАНИКА	88
<i>Жабко А. В.</i> Уральская школа геомехаников-маркшейдеров.....	89
<i>Ройтер М., Крах М., Кисслинг У., Векслер Ю.</i> Устойчивость забоя лавы на пласте мощностью 8,45 метра	101
<i>Пономаренко М. Р., Кутепов Ю. И.</i> Обоснование деформационного мониторинга открытых горных разработок на основе типизации горнотехнических объектов	107
<i>Лобанова Т. В., Трофимова О. Л., Ижболдина С. В., Лобанов С. А., Замятин С. Г., Матвеева Е. В.</i> Особенности и закономерности деформирования земной поверхности в районе подрабатываемых объектов при извлечении запасов предохранительных целиков Абаканского месторождения	116
<i>Панжин А. А., Панжина Н. А.</i> Исследование напряженно- деформированного состояния и структуры породного массива при открытой геотехнологии для геомеханического обоснования углов заоткоски бортов карьера.....	131
<i>Кольцов П. В., Иванов Ю. С.</i> Технологии маркшейдерского мониторинга геомеханических процессов при комбинированной разработке месторождений	147
<i>Ильясов Б. Т., Гузеев И. А.</i> Изучение трещиноватости горных пород железорудных месторождений на основе аэрофотосъёмки для обоснования параметров устойчивых уступов.....	165
<i>Морин С. В.</i> Обеспечение безопасной эксплуатации сооружений на месторождениях Урала	172
ИСТОРИЯ КАФЕДРЫ, ВОСПОМИНАНИЯ.....	179
<i>Жабко А. В.</i> Кафедра маркшейдерского дела Уральского государственного горного университета сегодня: проблемы и достижения	180

<i>Жабко А. В., Бадулин А. П., Ундрахтамир А., Даваабаяр П., Пурэвдаваа Д., Бямбажав Ц.</i> Историческая справка и вклад кафедры маркшейдерского дела Уральского государственного горного университета в обеспечение экологической и геомеханической безопасности при эксплуатации дамбы хвостохранилища обогатительной фабрики ГОКа «Эрдэнэт» за период 1990–2020 гг	192
<i>Бадулин А. П., Жабко А. В.</i> География гироскопического ориентирования подземных сооружений, выполненного кафедрой маркшейдерского дела Уральского государственного горного университета за 50-летний период (1969–2020)	205
<i>Земских В. Е.</i> Воспоминания выпускника кафедры маркшейдерского дела Земских В. Е. Годы учебы (1946–1951)	209
<i>Ягнышева В. В.</i> Вклад выпускников кафедры маркшейдерского дела Свердловского горного института (Уральского государственного горного университета) в строительство Екатеринбургского (Свердловского) метрополитена	214
<i>Земских Г. В.</i> История Березовской учебной маркшейдерской практики, которая продолжается	230