

УДК 622.271.33

Яковлев Виктор Леонтьевич,
доктор технических наук, профессор,
советник РАН, член-корреспондент РАН,
главный научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: yakovlev@igduran.ru

Яковлев Алексей Викторович,
кандидат технических наук,
заведующий сектором устойчивости
бортов карьеров,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: lubk_igd@mail.ru

Шимкив Екатерина Сергеевна,
научный сотрудник,
сектор устойчивости бортов карьеров,
Институт горного дела УрО РАН

Соколов Василий Владимирович,
младший научный сотрудник,
сектор устойчивости бортов карьеров,
Институт горного дела УрО РАН

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ РИСКОВ НАРУШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ И УСТУПОВ КАРЬЕРОВ*

Аннотация:

Оценка рисков нарушения устойчивости бортов и уступов карьеров в массивах скальных горных пород должна базироваться на результатах комплексного мониторинга состояния прибортовых массивов, выявлении опасных зон, исследовании причин деформаций с учетом изменяющегося во времени гравитационно-тектонического поля напряжений. Разработана обобщенная систематизация геомеханических рисков нарушения устойчивости бортов и уступов карьеров на основе учета влияния тектонических напряжений в зависимости от масштаба участка деформирования. Для условий конкретного карьера реестр рисков может быть детализирован по результатам пополнения базы данных о деформациях прибортовых массивов, при этом отнесение вероятных деформаций бортов и уступов к соответствующей категории риска должно производиться с учетом возможности тектонической подвижки массива и ухудшения прочностных свойств по протяженной трещине на основе геомеханических расчетов.

Ключевые слова: карьер, борт, уступ, риск нарушения устойчивости, деформация, тектонические напряжения, протяженная трещина, структура массива горных пород, прочностные свойства.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.03.095

Yakovlev Viktor L.
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Advisor to the RAS,
Corresponding Member of the RAS,
Chief Researcher,
Institute of Mining UB RAS,
58 Mamina-Sibiryaka Str., 62075 Ekaterinburg
e-mail: yakovlev@igduran.ru

Yakovlev Alexey V.
Candidate of Technical Sciences,
Head of the Sector of stability
of quarry boards,
Institute of Mining UB RAS
e-mail: lubk_igd@mail.ru

Shimkiv Ekaterina S.
Researcher,
Sector of stability of quarry boards,
Institute of Mining UB RAS

Sokolov Vasily V.
Junior Researcher,
Sector of stability of quarry boards,
Institute of Mining UB RAS

SYSTEMATIZATION OF GEOMECHANICAL RISKS OF INSTABILITY SIDES AND LEDGES OF QUARRIES

Abstract:

The assessment of the risks of instability of sides and ledges of quarries in rock formations should be based on the results of comprehensive monitoring of the condition of instrument arrays, identification of hazardous areas, and investigation of the causes of deformations, taking into account the time-varying gravitational-tectonic stress field. A generalized systematization of geomechanical risks of disruption of the stability of sides and ledges of quarries has been developed based on the consideration of the influence of tectonic stresses depending on the scale of the deformation site. For the conditions of a particular quarry, the risk register can be detailed based on the results of updating the database on deformations of instrument arrays, while assigning probable deformations of the sides and ledges to the appropriate risk category should take into account the possibility of tectonic mass movement and deterioration of strength properties through a stretched crack based on geomechanical calculations.

Key words: quarry, side, ledge, risk of instability, deformation, tectonic stresses, extended crack, rock mass structure, strength properties.

* Статья подготовлена при выполнении Гос. задания №075-00410-25-00. № гос. рег. 125070908257-0. Тема 1 (2025-2027). Методология обоснования перспектив технологического развития комплексного освоения минерально-сырьевых ресурсов твердых полезных ископаемых России (FUWE-2025-0001).

Введение

В соответствии с [1] эксплуатирующей организацией должен выполняться прогноз устойчивости бортов и уступов карьеров, в том числе оценка и управление рисками нарушения устойчивости их бортов и уступов, развития аварийных ситуаций, минимизации негативных последствий от развития деформаций.

В дополнение к [1] в ИПКОН РАН разработаны методические указания [2], которые содержат предложения и рекомендации по оценке и управлению рисками, организации мониторинга и выработке мероприятий по управлению устойчивостью бортов и уступов карьеров.

В [1] указано, что обоснование параметров устойчивости бортов и уступов карьеров, а также перечень мер по обеспечению их устойчивости определяется техническим проектом разработки месторождения полезных ископаемых. Изучение массивов горных пород должно вестись на стадиях освоения месторождения: геологоразведка, проектирование, эксплуатация, ликвидация (консервация) горных выработок. В случае выявления в процессе отработки карьера отклонений от значений физико-механических характеристик и (или) структуры массива горных пород, принятых для оценки устойчивости бортов и уступов карьеров при проектировании, должен проводиться перерасчет параметров бортов и уступов с учетом вновь полученных исходных данных.

По мере формирования выработанного пространства карьера из-за воздействия тектонических напряжений на некоторых участках массива происходят периодические подвижки, вызывающие изменение структуры и прочностных свойств пород по трещинам, в результате чего с течением времени изменяются условия устойчивости бортов и уступов, поэтому выявление опасных зон, исследование причин и оценка рисков нарушения устойчивости бортов и уступов карьеров в массивах скальных горных пород с учетом изменяющегося во времени гравитационно-тектонического поля напряжений является актуальной задачей.

Оценка уровня рисков с помощью матрицы

Оценку уровня рисков рекомендуется производить по матрице (рис. 1), приведенной в [2], на основе вероятности (табл. 1) и тяжести последствий (табл. 2) с последующим выбором мер реагирования.

Матрица рисков			Последствия				
			Незначительные	Низкие	Средние	Высокие	Чрезвычайные
			1	2	3	4	5
Вероятность риска							
Качественная		Количественная					
A	Очень высокая	>40%	Средний	Высокий	Высокий	Очень высокий	Очень высокий
B	Высокая	20÷40%	Низкий	Средний	Высокий	Высокий	Очень высокий
C	Средняя	10÷20%	Низкий	Низкий	Средний	Высокий	Очень высокий
D	Низкая	1÷10%	Очень низкий	Низкий	Средний	Высокий	Очень высокий
E	Очень низкая	<1%	Очень низкий	Низкий	Средний	Средний	Высокий

Рис. 1. Матрица рисков для определения уровня риска

Таблица 1

Качественная оценка вероятности неблагоприятного события

Категория	Качественная оценка	Характеристика событий
A	Весьма высокая	Событие происходило часто. Событие ожидаемо с высокой степенью вероятности в ближайшее время.
B	Высокая	Событие происходило неоднократно. Произойдет с высокой степенью определенности.
C	Средняя	Событие происходило ранее и может произойти в будущем.
D	Низкая	Событие может произойти при маловероятном стечении обстоятельств.
E	Очень низкая	Событие может произойти только при непрогнозируемом стечении форс-мажорных обстоятельств.

Таблица 2

Оценка тяжести последствий обрушений бортов и уступов карьеров

Тяжесть последствий				
Незначительные	Низкие	Средние	Высокие	Чрезвычайные
Обрушение на отдельном участке вне зоны ведения горных работ, не влияющее на технологический процесс	Ликвидация обрушения требует несколько дней или не влияет на технологический процесс	Краткосрочная ликвидация обрушения	Потеря подготовленных к выемке запасов	Угроза жизни и здоровью людей
	Обрушение откосов с коротким периодом эксплуатации	Простои основного технологического оборудования	Среднесрочная ликвидация последствий обрушения	Потеря транспортного съезда (при отсутствии резервного)
	Обрушения не оказывают влияния на внутрикарьерную инфраструктуру	Повреждение оборудования и инфраструктуры, требующее ремонта	Повреждение и длительные простои основного технологического оборудования и/или инфраструктуры, требующее капитального ремонта	Нарушение технологического цикла, требующее технического перевооружения
	Повреждения оборудования отсутствуют	Восстановление съезда или ремонт путей откатки	Потеря основного технологического оборудования и/или инфраструктуры Потеря транспортного съезда (при наличии резервного)	

Геомеханические риски влекут за собой вероятность возникновения обрушений и тяжесть их последствий [3]. Вероятность риска оценивается на основе предположения (экспертных оценок), либо по результатам количественного анализа, либо по фактическим данным о частоте события. Тяжесть последствий обрушений для различных масштабов откосов (уступ, группа уступов и борт) оценивается качественно.

*Деформации бортов и уступов
в гравитационно-тектоническом поле напряжений*

Устойчивость бортов и уступов в скальных породах без учета тектонических напряжений зависит от ориентировки и прочностных свойств поверхностей ослабления в массиве. Наибольшее влияние на устойчивость уступов оказывают протяженные трещины, имеющие падение в направлении выработанного пространства карьера и низкие прочностные свойства по поверхности ослабления.

Деформирование бортов и уступов карьеров в скальных массивах вызывается совместным воздействием гравитационного и тектонического полей напряжений [4 – 9].

При прогнозировании деформаций откосов на карьерах необходимо различать понятия «устойчивость отдельного уступа или группы уступов» и «устойчивость борта карьера в целом» [10]. Если для уступа или участка борта основным видом структурных неоднородностей, влияющих на их устойчивость, являются, как правило, трещины VI и V ранга [1] протяженностью первые десятки метров, то устойчивость борта определяется неблагоприятно ориентированными структурными неоднородностями V и IV ранга протяженностью десятки и первые сотни метров.

При гравитационно-тектоническом типе напряженно-деформированного состояния в нетронutom массиве максимальная и промежуточная компоненты главных напряжений горизонтальны и определяются тектоническими силами, действующими в рассматриваемом регионе, а минимальная компонента ориентирована в вертикальной плоскости [4, 10 – 12].

На основании изучения данных по месторождениям полезных ископаемых, которые располагаются на Урале, было выявлено, что ориентировка главного максимального напряжения в современную геологическую эпоху имеет два основных азимута [13]. С начала тектонической активизации Уральского орогена главное максимальное напряжение было ориентировано по азимуту, имеющему среднее значение 285° . Изучение активных тектонических нарушений и современной речной сети показало, что в четвертичном периоде выявилось существенное влияние главного максимального напряжения со средним азимутом 260° . В настоящее время оба этих направления действуют одновременно [14].

При формировании выработанного пространства карьера параметры тектонического поля напряжений изменяются вблизи откосов уступов и участков бортов. Максимальная компонента тектонической силы в результате трансформации поля напряжений ориентирована в массиве согласно с углом наклона борта карьера [4, 15].

При расчетной оценке устойчивости борта в целом следует учитывать горизонтальную направленность тектонической силы F_T , поскольку потенциальная поверхность скольжения располагается на значительном удалении от поверхности борта, а при расчетной оценке устойчивости уступа или участка борта – изменение направления действия тектонической силы F_T вблизи откоса.

В статье [12] показано, как при тектоническом воздействии на массив устойчивость уступов и участков бортов может не обеспечиваться в зависимости от ориентировки и характеристики поверхности протяженной трещины.

В качестве примера для условий Качканарского ГОКа в табл. 3 и на рис. 2 показано изменение параметров устойчивости уступа высотой 30 м с углом откоса 60° , подсеченного протяженной трещиной, при сцеплении по трещине $C' = 0,2$ МПа и угле трения по трещине $\varphi' = 15^\circ$.

Расчеты проведены по разработанной методике [12] в плоской постановке задачи при наличии в массиве протяженной трещины, имеющей падение в направлении выработанного пространства карьера, с использованием разработанной компьютерной программы в редакторе Excel.

Таблица 3

**Результаты расчетов устойчивости уступа высотой 30 м
с углом откоса 60° при $C' = 0,2$ МПа и $\varphi' = 15^\circ$**

Угол падения трещины β , град.	Коэффициент запаса устойчивости (n) при F_T									
	0 МН	4,0 МН	4,5 МН	5,0 МН	5,5 МН	6,0 МН	6,5 МН	7,0 МН	7,5 МН	8,0 МН
10	4,41	3,56	3,48	3,40	3,32	3,25	3,18	3,12	3,05	2,99
20	2,49	1,89	1,83	1,78	1,74	1,69	1,65	1,61	1,57	1,53
30	2,00	1,38	1,33	1,29	1,24	1,20	1,17	1,13	1,10	1,07
40	2,07	1,21	1,15	1,10	1,05	1,01	0,97	0,93	0,90	0,86
50	3,12	1,26	1,17	1,10	1,03	0,97	0,92	0,87	0,83	0,79

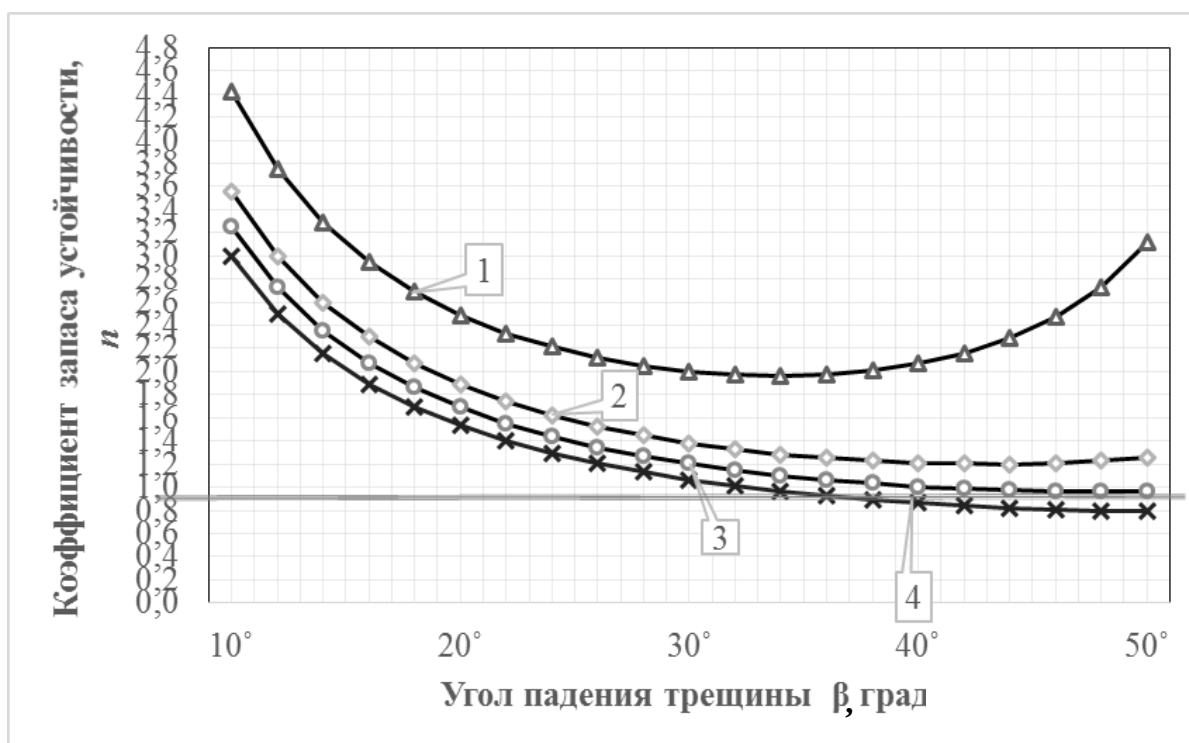


Рис. 2. Результаты расчетов устойчивости уступа высотой 30 м с углом откоса 60° при $C' = 0,2$ МПа и $\varphi' = 15^\circ$:

1 – $F_T = 0$ МН; 2 – $F_T = 4,0$ МН; 3 – $F_T = 6,0$ МН; 4 – $F_T = 8,0$ МН

При расчете без учета тектонических сил ($F_T = 0$ МН) уступ оказывается устойчивым при любом угле падения протяженной трещины в направлении выработанного пространства карьера.

Нарушение устойчивости уступа в зависимости от величины F_T прогнозируется при следующих значениях угла падения трещины:

- более 42° при $F_T = 6,0$ МН;
- более 33° при $F_T = 8,0$ МН.

Разработанная компьютерная программа позволяет установить предельные параметры уступа (h и α) или группы уступов, изменяя прочностные свойства (C' и ϕ') протяженной трещины, угол ее падения β и величину F_T .

Виды, причины и степень опасности деформаций бортов и уступов карьеров в массивах скальных горных пород

Деформации бортов, участков бортов и уступов карьеров могут происходить внезапно или иметь продолжительный подготовительный период.

Внезапное обрушение происходит по готовым протяженным поверхностям тектонического происхождения, чаще в процессе постановки уступов в предельное положение. При наличии подпорной стенки на рабочих уступах внезапного обрушения обычно не наблюдается.

На уступах, поставленных в предельное положение, деформации могут не происходить в течение многих лет. Однако при тектоническом воздействии на массив горных пород условия устойчивости бортов, участков бортов и уступов изменяются, что приводит к возникновению деформаций, степень опасности которых определяется удаленностью от рабочей зоны и транспортных берм.

При оценке рисков следует учитывать необходимость обеспечения сохранности транспортных коммуникаций и минимизации воздействия взрывных работ на изменение структуры законтурного массива горных пород.

Риск деформации бортов карьера по всей высоте следует отнести к категории D (см. табл. 1) с низкой вероятностью неблагоприятного события, поскольку параметры бортов обосновываются по результатам расчетов устойчивости с необходимым коэффициентом запаса в соответствии с принятой геомеханической моделью прибортового массива, в которой должно быть предусмотрено участие протяженных тектонических трещин в поверхности скольжения. Учитывая тяжесть последствий (см. табл. 2), возникновение деформаций бортов карьеров в соответствии с матрицей (см. рис. 1), риск можно отнести к категории D4 (высокий) и даже к категории D5 (чрезвычайный). Формирование крупномасштабных деформаций бортов карьера определяется совокупностью факторов: тектоническая подвижность, структуры различных рангов, прочностные свойства пород, обводненность борта и др.

Риск деформации участков бортов следует отнести к категории D с низкой вероятностью неблагоприятного события, основываясь на результатах расчетов устойчивости бортов карьеров. С учетом тяжести последствий риск деформации участков бортов карьеров можно отнести к категории D3 (средний), так как возникает необходимость проведения анализа ситуации и разработки мероприятий по снижению риска до приемлемого уровня, ликвидации последствий данного процесса, проведения мониторинга устойчивости геомеханической службой предприятия, возможны простои технологического оборудования.

Деформации групп уступов в скальных породах обусловлены наличием протяженных поверхностей ослабления. Эти деформации в рабочей зоне карьера и вблизи транспортных берм (категория D4) представляют опасность для персонала и могут нарушить производственный процесс.

Риск деформации уступов следует отнести к категории C или B, так как локальные обрушения уступов – наиболее распространенный вид нарушения устойчи-

вости скальных прибортовых массивов карьеров. Обрушение на отдельном участке вне зоны ведения горных работ не влияет на технологический процесс, поэтому тяжесть последствий локальных обрушений уступов, поставленных в предельное положение, можно отнести к незначительной или низкой, что по матрице рисков соответствует категориям C1, C2 или B1. Тяжесть последствий при возникновении вывалов на уступах в рабочей зоне можно оценить как среднюю, так как возникает необходимость проведения анализа ситуации и разработки мероприятий по снижению риска категории C3 до приемлемого уровня, ликвидации последствий данного процесса, проведения мониторинга устойчивости геомеханической службой предприятия, возможны простои технологического оборудования.

Деформации уступов в скальных породах обусловлены наличием систем трещин или единичных протяженных трещин неблагоприятной ориентации, сланцеватости, локальных зон слабых или дезинтегрированных пород. Взрывные работы при оформлении уступов вызывают дополнительное изменение структуры законтурного массива.

В скальных породах максимально достижимый генеральный угол борта во многом обуславливается конструктивными параметрами уступов и берм, в таких условиях обеспечение локальной устойчивости уступов имеет первостепенное значение. Для минимизации рисков необходимо расчетное обоснование ширины предохранительных берм, чтобы обеспечить их улавливающую способность в случае обрушения вышележащего уступа.

Риск деформации транспортных берм следует отнести к категории D с низкой вероятностью неблагоприятного события, основываясь на результатах расчетов устойчивости бортов карьеров. Тяжесть последствий при возникновении деформаций транспортных берм можно отнести к средней (категория D3) или высокой (категория D4), так как возникает необходимость проведения анализа ситуации и разработки мероприятий по снижению риска до приемлемого уровня, ликвидации последствий данного процесса (восстановление съезда), проведения мониторинга устойчивости геомеханической службой предприятия, возможны простои технологического оборудования. При отсутствии резервного съезда тяжесть последствий разрушения транспортной бермы можно отнести к чрезвычайной ситуации (категория D5).

Риск камнепада часто имеет место в случае крутых углов откоса уступов и/или участков борта между транспортными съездами или при большой высоте уступов. Деформации осыпания и камнепады возникают за счет нарушения верхней бровки уступов взрывными работами.

В табл. 4 приведена систематизация геомеханических рисков нарушения устойчивости бортов и уступов карьеров на основе учета влияния тектонических напряжений в зависимости от масштаба участка деформирования.

На этапе проектирования риск не должен превышать среднего уровня [2]. На этапе эксплуатации на участке с риском среднего уровня допускается ведение горных работ при условии внедрения мероприятий, разработанных на этапе проектирования или по результатам мониторинга.

Оценку рисков нарушения устойчивости бортов при проектировании предлагается производить с учетом подвижности массива под воздействием регионального поля тектонических напряжений. По мере развития горных работ и постановки уступов в предельное положение появляется возможность дополнительного изучения структуры массива и его НДС, выявления ранее не учтенных протяженных трещин и признаков тектонической подвижности участков бортов карьера. Поэтому оценка рисков и разработка мероприятий по снижению рисков нарушения устойчивости должны периодически пересматриваться геомеханической службой предприятия или специализированной организацией.

Таблица 4

Систематизация геомеханических рисков нарушения устойчивости бортов и уступов карьеров на основе учета влияния тектонических напряжений

Участок деформирования	Факторы, вызывающие риски	Признаки тектонической подвижности массива	Категория по матрице рисков	Меры по уменьшению риска
Борт карьера по всей высоте	Трещины IV и V ранга с падением в карьер	Нет	D3	Организация комплексного мониторинга
		Есть	D4, D5	Организация комплексного мониторинга, дополнительное изучение структуры и НДС массива, расчеты устойчивости бортов с учетом тектонических напряжений
Участок борта в предельном положении	Трещины V и VI ранга с падением в карьер	Нет	D2	Организация комплексного мониторинга
		Есть	D3	Организация комплексного мониторинга, дополнительное изучение структуры и НДС массива, расчеты устойчивости участка борта с учетом тектонических напряжений
Участок борта в рабочей зоне	Трещины V и VI ранга с падением в карьер	Нет	D3	Организация комплексного мониторинга, дополнительное изучение структуры массива
		Есть	D4	Организация комплексного мониторинга, дополнительное изучение структуры и НДС массива, расчеты устойчивости участка борта с учетом тектонических напряжений
Уступ в предельном положении	Трещины VI ранга с падением в карьер	Нет	B1, C1, C2	Маркшейдерский мониторинг, дополнительное изучение структуры массива
		Есть	C3	Маркшейдерский мониторинг, дополнительное изучение структуры и НДС массива, перерасчет параметров уступов с учетом тектонических напряжений
Уступ в рабочей зоне	Трещины VI ранга с падением в карьер	Нет	C2	Маркшейдерский мониторинг, дополнительное изучение структуры массива
		Есть	C3	Маркшейдерский мониторинг, дополнительное изучение структуры и НДС массива, перерасчет параметров уступов с учетом тектонических напряжений
Транспортная берма	Заколы на берме и обрушения уступов	Нет	D3	Маркшейдерский мониторинг, дополнительное изучение структуры массива
		Есть	D4, D5	Маркшейдерский мониторинг, дополнительное изучение структуры и НДС массива, перерасчет параметров уступов с учетом тектонических напряжений

В соответствии с [1] на предприятии должна быть создана геомеханическая служба для выполнения следующих задач:

- обследование карьера для оценки геомеханической ситуации, соответствия проектных решений реальным горно-геологическим условиям;
- сбор геомеханических данных с поверхности откосов карьера и по керну скважин;

- анализ физико-механических свойств пород и параметров трещиноватости массива;
- систематизация собранных данных в базу данных по месторождению;
- расчеты устойчивости бортов и уступов карьера;
- установление причин произошедших деформаций, анализ их общих закономерностей, прогноз и тенденции их дальнейшего развития;
- изучение источников опасных факторов, оценка рисков развития деформаций и разработка рекомендаций по управлению ими;
- организация наблюдений за устойчивостью бортов и уступов карьера.

Кроме того, требуется:

- выявление участков подвижности (с выделением опасных зон) в прибортовых массивах карьера по результатам инструментальных мониторинговых наблюдений с использованием электронных тахеометров, лазерных сканеров и систем спутникового позиционирования;
- поиск признаков тектонических сдвижений;
- оценка уровня и направления тектонических напряжений;
- проведение расчетов устойчивости карьерных откосов в гравитационно-тектоническом поле напряжений.

Отнесение вероятных деформаций бортов и уступов к соответствующей категории риска должно производиться с учетом возможности тектонической подвижки массива и ухудшения прочностных свойств по протяженной трещине на основе геомеханических расчетов, например, по разработанной методике [8].

Выводы

1. По мере формирования выработанного пространства карьера в скальных горных породах из-за воздействия тектонических напряжений на некоторых участках массива происходят периодические подвижки, вызывающие изменение структуры и прочностных свойств пород по трещинам, в результате чего с течением времени изменяются условия устойчивости бортов и уступов, поэтому оценка рисков нарушения устойчивости бортов и уступов карьеров в дополнение к нормативным документам должна базироваться на результатах комплексного мониторинга состояния прибортовых массивов, выявлении опасных зон, исследовании причин деформаций с учетом изменяющегося во времени гравитационно-тектонического поля напряжений с учетом расположения транспортных коммуникаций и воздействия взрывных работ на изменение структуры законтурного массива горных пород.

2. Разработана обобщенная систематизация геомеханических рисков нарушения устойчивости бортов и уступов карьеров на основе учета влияния тектонических напряжений в зависимости от масштаба участка деформирования. Для условий конкретного карьера реестр рисков может быть детализирован по результатам пополнения базы данных о деформациях прибортовых массивов, при этом отнесение вероятных деформаций бортов и уступов к соответствующей категории риска должно производиться с учетом возможности тектонической подвижки массива и ухудшения прочностных свойств по протяженной трещине на основе геомеханических расчетов.

3. Результаты исследований рекомендуется использовать при проектировании параметров бортов карьеров в скальных породах с учетом воздействия регионального поля напряжений и его изменения вблизи бортов в динамике развития горных работ.

Список литературы

1. *Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов*: утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 13.11.20 г. № 439: введены в действие с

01.01.2021 г. Москва, 2021, 85 с. (Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности).

2. *Методические указания по оценке рисков развития деформаций, мониторингу и управлению устойчивостью бортов и уступов, карьеров, разрезов и откосов отвалов* / ИПКОН им. Н. В. Мельникова РАН; разработ.: М. В. Рыльникова [и др.]. Москва: ИПКОН РАН, 2022, 90 с.

3. Шабаров А.Н., Носков В.А., Павлович А.А., Черепов А.А., 2022. Понятие геомеханического риска при ведении открытых горных работ. *Горный журнал*, № 9, С. 22-28. DOI: 10.17580/gzh.2022.09.04.

4. Яковлев А.В., Ермаков Н.И., 2006. *Устойчивость бортов рудных карьеров при действии тектонических напряжений в массиве*. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 231 с.

5. Рыбин В.В., Жиров Д.В., Мелихова Г.С., Климов С.А., 2011. Комплексная методика инженерно-структурных исследований и мониторинга геомеханического состояния массива пород в целях проектирования и эксплуатации глубоких карьеров. *Современная тектонофизика. Методы и результаты*. Москва: ИФЗ, С. 100-109.

6. Кожуховский А.В., Завьялов А.А., Козырев А.А., Серый С.С., Дунаев В.А., 2012. Инновационные технологии мониторинга и прогнозирования устойчивости бортов глубокого карьера. *Горный журнал*, № 10, С. 29-35.

7. Козырев А.А., Рыбин В.В., 2015. Геомеханическое обоснование рациональных конструкций бортов карьеров в тектонически напряженных массивах. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*, Т. 2, С. 245-250.

8. Тагильцев С.Н., 2003. *Основы гидрогеомеханики скальных массивов*: Учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 88 с.

8. Яковлев В.Л., Яковлев А.В., Шимкив Е.С., 2023. Методические основы обеспечения устойчивости уступов и участков бортов карьеров. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 6, С. 3-12. DOI: 10.15372/FTPRI20230601.

10. Рыбин В.В., 2016. *Развитие теории геомеханического обоснования рациональных конструкций бортов карьеров в скальных тектонически напряженных породах*: дис. ... доктора технических наук: 25.00.20. Апатиты, 385 с.

11. Жабко А.В., 2019. *Исследование закономерностей процесса дезинтеграции горных пород на основе теории устойчивости откосов горнотехнических сооружений*: дис. ... доктора технических наук: 25.00.20. Екатеринбург, 331 с.

12. Яковлев А.В., Шимкив Е.С., 2024. Методика расчетного обоснования устойчивости уступа с протяженной трещиной в гравитационно-тектоническом поле напряжений. *Проблемы недропользования*, № 4, С. 56-63. DOI: 10.25635/2313-1586. 2024.04.056.

13. Тагильцев С.Н., 2018. Закономерности пространственного расположения тектонических нарушений в поле современного напряженного состояния земной коры. *Горный журнал. Изв. вузов*, № 7, С. 52-66.

14. Тагильцев С.Н., Панжин А.А., 2020. Геомеханические закономерности горизонтальных и вертикальных деформаций массива горных пород в районе Качканарского железорудного месторождения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 3-1, С. 235-245. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-235-245.

15. Зубков А.В., 2000. *Геомеханика и геотехнология*. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 335 с.

References

1. *Pravila obespecheniya ustoichivosti bortov i ustupov kar'erov, razrezov i otkosov otvalov* [Rules for ensuring the stability of sides and ledges of quarries, sections and slopes of dumps]: utv. prikazom Federal'noi sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i

atomnomu nadzoru ot 13.11.20 g. № 439: vvedeny v deistvie s 01.01.2021 g. Moscow, 2021, 85 p. (Federal'nye normy i pravila v oblasti promyshlennoi bezopasnosti).

2. Metodicheskie ukazaniya po otsenke riskov razvitiya deformatsii, monitoringu i upravleniyu ustoichivost'yu bortov i ustupov, kar'erov, razrezov i otkosov otvalov [Methodological guidelines for assessing the risks of deformation development, monitoring and managing the stability of sides and ledges, quarries, sections and slopes of dumps] / IPKON im. N.V. Mel'nikova RAN; razrab.: M.V. Ryl'nikova [i dr.]. Moscow: IPKON RAN, 2022, 90 p.

3. Shabarov A.N., Noskov V.A., Pavlovich A.A., Cherepov A.A., 2022. Ponyatie geomekhanicheskogo riska pri vedenii otkrytykh gornykh rabot [Concept of geomechanical risk in open-pit mining operations]. Gornyi zhurnal, № 9, P. 22-28. DOI: 10.17580/gzh.2022.09.04.

4. Yakovlev A.V., Ermakov N.I., 2006. Ustoichivost' bortov rudnykh kar'erov pri deistvii tektonicheskikh napryazhenii v massive [Stability of the sides of ore pits under the action of tectonic stresses in the massif] . Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 231 p.

5. Rybin V.V., Zhirov D.V., Melikhova G.S., Klimov S.A., 2011. Kompleksnaya metodika inzhenerno-strukturnykh issledovaniy i monitoringa geomekhanicheskogo sostoyaniya massiva porod v tselyakh proektirovaniya i ekspluatatsii glubokikh kar'erov. [The comprehensive methodology for engineering and structural studies and monitoring of the geomechanical condition of a rock mass in order to design and operate deep quarries]. Sovremennaya tektonofizika. Metody i rezul'taty. Moscow: IFZ, P. 100-109.

6. Kozhukhovskii A.V., Zav'yalov A.A., Kozyrev A.A., Seryi S.S., Dunaev V.A., 2012. Innovatsionnye tekhnologii monitoringa i prognozirovaniya ustoichivosti bortov glubokogo kar'era [Innovative technologies for monitoring and forecasting the stability of deep-pit sides] . Gornyi zhurnal, № 10, P. 29-35.

7. Kozyrev A.A., Rybin V.V., 2015. Geomekhanicheskoe obosnovanie ratsional'nykh konstruksii bortov kar'erov v tektonicheski napryazhennykh massivakh [Geomechanical substantiation of rational constructions of quarry sides in tectonically stressed massifs]. Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk, Vol. 2, P. 245-250.

8. Tagil'tsev S.N., 2003. Osnovy gidrogeomekhaniki skal'nykh massivov [Fundamentals of hydrogeomechanics of rock masses]: Uchebnoe posob. Ekaterinburg: Izd-vo UGGGA, 88 p.

9. Yakovlev V.L., Yakovlev A.V., Shimkiv E.S., 2023. Metodicheskie osnovy obespecheniya ustoichivosti ustupov i uchastkov bortov kar'erov [Methodological foundations for ensuring the stability of ledges and sections of quarry sides]. Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh, № 6, P. 3-12. DOI: 10.15372/FTPRPI 20230601.

10. Rybin V.V., 2016. Razvitie teorii geomekhanicheskogo obosnovaniya ratsional'nykh konstruksii bortov kar'erov v skal'nykh tektonicheski napryazhennykh porodakh [Development of the theory of geomechanical substantiation of rational constructions of quarry sides in rocky tectonically stressed rocks]: dis. ... doktora tekhnicheskikh nauk: 25.00.20. Apatity, 385 p.

11. Zhabko A.V., 2019. Issledovanie zakonomernostei protsessa dezintegratsii gornykh porod na osnove teorii ustoichivosti otkosov gornotekhnicheskikh sooruzhenii [Investigation of the regularities of the process of rock disintegration based on the theory of slope stability of mining facilities]: dis. ... doktora tekhnicheskikh nauk: 25.00.20. Ekaterinburg, 331 p.

12. Yakovlev A.V., Shimkiv E.S., 2024. Metodika raschetnogo obosnovaniya ustoichivosti ustupa s protyazhennoi treshchinoi v gravitatsionno-tektonicheskom pole napryazhenii [A method for calculating the stability of a ledge with an extended crack in a gravitational-tectonic stress field]. Problemy nedropol'zovaniya, № 4, P. 56-63. DOI: 10.25635/2313-1586. 2024.04.056.

13. Tagil'tsev S.N., 2018. Zakonomernosti prostranstvennogo raspolozheniya tektonicheskikh narushenii v pole sovremennogo napryazhennogo sostoyaniya zemnoi kory [Patterns of spatial distribution of tectonic disturbances in the field of the current stress state of the Earth's crust]. Gornyi zhurnal. Izv. vuzov, № 7, P. 52-66.

14. Tagil'tsev S.N., Panzhin A.A., 2020. Geomekhanicheskie zakonomernosti gorizontal'nykh i vertikal'nykh deformatsii massiva gornyx porod v raione Kachkanarskogo zhelezorudnogo mestorozhdeniya [Geomechanical patterns of horizontal and vertical deformations of the rock mass in the area of the Kachkanarsky iron ore deposit]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 3-1, P. 235-245. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-235-245.

15. Zubkov A.V., 2000. Geomekhanika i geotekhnologiya [Geomechanics and geotechnology]. Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 335 p.