

УДК 622.831

**ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
МАССИВА ПОРОД В БОРТУ КАРЬЕРА**

**В. В. Рыбин, К. Н. Константинов, Ю. А. Старцев**

*Горный институт КНЦ РАН,*

*E-mail: k.konstantinov@ksc.ru, ул. Ферсмана, 24, 184209, г. Апатиты, Россия*

Приведены результаты исследования геомеханического состояния прибортового массива пород в окрестности крупной карьерной выемки с использованием сейсмического метода. С помощью натурных определений скоростей прохождения упругих волн в массиве установлены его упругие характеристики, на основе которых сделан вывод об устойчивости участка. Показано, что сейсмическим методом можно получать достаточно надежные данные о динамике изменения геомеханического состояния приконтурного массива на большой площади и осуществлять контроль геомеханической ситуации и устойчивости участков борта карьера. На примере карьера “Железный” АО “Ковдорский ГОК” представлен многолетний опыт применения сейсмического метода для решения задач обеспечения устойчивости участков борта карьера. Изложенный подход применим для предприятий горной промышленности, разрабатывающих месторождения полезных ископаемых с формированием глубоких карьерных выемок.

*Геомеханика, устойчивость борта карьера, уступ, сейсмический метод, профилирование, коэффициент Пуассона, томография, мониторинг*

DOI: 10.15372/FTPRPI20230505

---

Важным элементом системы прогноза и оценки состояния массива горных пород выступают методы инструментального контроля, которые позволяют определять и квалифицировать уровень реальной опасности, а также выполнять мониторинг геомеханического состояния массива на основе контроля изменения физических свойств среды. В настоящее время для контроля устойчивости бортов карьеров широко применяются геофизические и различные варианты дистанционных методов (геодезия, радарная съемка и др.). Предметом исследования дистанционных методов является поверхность борта карьера и его участков (групп уступов) с целью выявления опасных смещений (деформаций) [1, 2]. Геофизические методы позволяют следить за изменениями геомеханического состояния глубинного массива пород [3–6]. В совокупности геофизические и дистанционные методы способствуют созданию цельной взаимодополняющей динамики изменений поверхности карьера и законтурного массива пород.

Цель настоящей работы — применение сейсмического метода для контроля геомеханического состояния законтурного массива пород карьера “Железный” АО “Ковдорский ГОК”. В настоящее время карьер претерпевает интенсивное развитие, связанное с углубкой и разноской борта, что требует постоянного контроля устойчивости элементов открытой геотехнологии.

В связи с принятием решения о формировании карьерной выемки с высотой борта около 900 м организация системы мониторинга устойчивости приобрела особую значимость [7]. Развитие подсистем мониторинга устойчивости на региональном и локальном уровнях активно проводится с 2000-х годов. Наиболее эффективными с точки зрения получения информации о физических свойствах пород, слагающих борт карьера, представляются геофизические методы контроля. Горный институт КНЦ РАН совместно с АО «Ковдорский ГОК» обладает многолетним опытом применения сейсмического метода для выполнения прогноза и оценки геомеханического состояния законтурного массива пород борта в целом и его участков, а также групп уступов и отдельных уступов. Система микросейсмического мониторинга функционирует на карьере «Железный» с 2007 г. и решает главным образом задачу выявления предвестников развития деформаций в законтурном массиве пород с последующим выделением и детальным изучением потенциально неблагоприятных участков с точки зрения устойчивости борта [8].

На этапах формирования и эксплуатации уступов, поставленных в конечное положение с применением щадящих технологий взрывания, особенно важен периодический инструментальный контроль геологической среды на потенциально неустойчивых участках борта. Сейсмический метод позволяет определить структуру массива, выявить высокопрочные и ослабленные участки не только на контуре выработки, но и в глубине массива. С целью оперативного получения динамических упругих характеристик приконтурного массива пород на участках борта, актуальных с точки зрения устойчивости, выполняются периодические сейсмические измерения профилированием и томографией.

#### **МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ ДАННЫХ**

В исследованиях сейсмическим методом использовалась 24-канальная, полностью автоматизированная сейсмостанция SmartSeis фирмы Geometrics с высокой частотой дискретизации и широким частотным и динамическим диапазоном. Для получения упругих характеристик массива пород (скорости продольных и поперечных волн) применялись сейсмоприемники Geospace. Количество исходных данных для последующей обработки определялось путем умножения количества датчиков (24 шт.) на источники возбуждения сейсмического сигнала (30 шт.). Массив данных для последующей обработки составлен с помощью сейсмических лучей.

Первичные результаты исследований представлены в виде сейсмограмм, на которых выделяется время прихода продольной и поперечной волн. Обработка данных выполнена с помощью специализированной программы XТomo-LM.

#### **ИССЛЕДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ**

Для оценки сохранности массива с 2006 г. применяется методика сейсмического профилирования на продольных преломленных волнах (рис. 1). Методика работ аналогична наземной классической схеме расстановки приемников и источников сейсмических сигналов (обозначены точками). Отличие в том, что изучается горизонтальная плоскость от контура карьера вглубь массива (штриховая область на рис. 1). Возбуждение сейсмических сигналов осуществляется около каждого приемника механическим способом с помощью удара кувалды. Разработанная методика позволяет получить достаточное количество данных, с помощью которых можно адекватно отразить структуру массива пород. Возбуждение и прием упругих колебаний происходит вдоль общего профиля. Глубина зоны контроля в плоскости от контура уступа составляет около 30 м и обеспечивается выбором эффективного расстояния между датчиками приемников и источников сейсмических сигналов. Протяженность зоны контроля вдоль откоса уступа может изменяться в пределах 100–200 м. С 2006 г. на протяжении пяти лет функционировал наблюдательный полигон на западном участке борта карьера «Железный» [9]. В результате

исследований установлено влияние двух основных факторов на распределение скорости продольной волны в прибортовом массиве пород — техногенного и экзогенного. Влияние экзогенного фактора сводится в основном к вариациям водопритоков в пределах контролируемого участка. Воздействие техногенного фактора в виде буровзрывных работ на распределение упругих скоростей в массиве пород имеет необратимый характер и определяет глубину нарушенной зоны от поверхности откоса уступа. Это подтверждается аналогичными исследованиями, выполненными на восточном и южном участках борта.

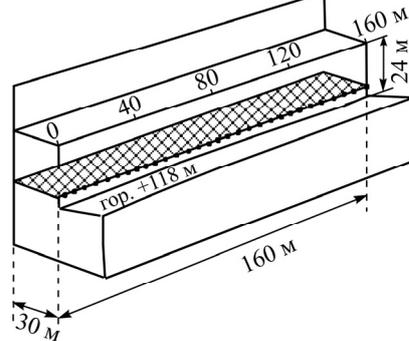


Рис. 1. Схема проведения сейсмического профилирования

Для качественной сравнительной оценки геомеханического состояния проведен статистический анализ полученных данных. На рис. 2 показано распределение значений скорости продольной волны  $V_p$  на полигонах северо-западного, восточного и южного участков борта карьера “Железный”.

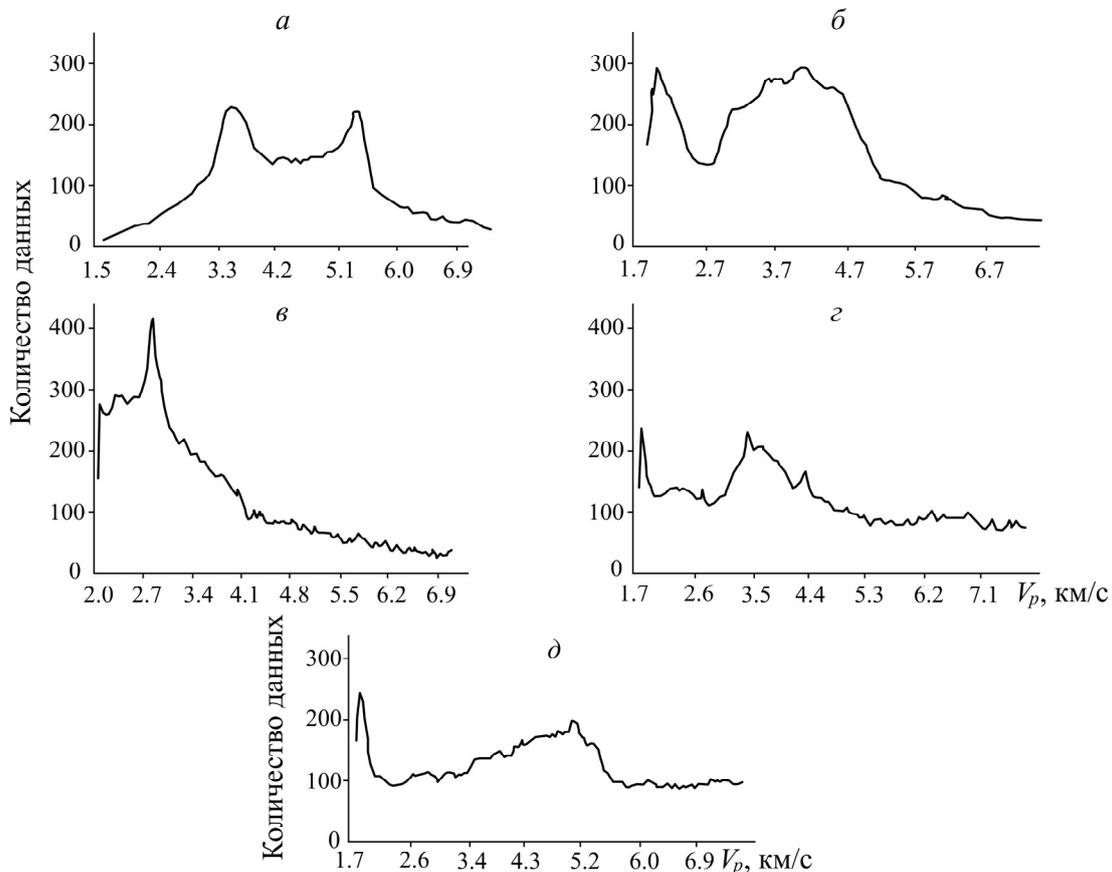


Рис. 2. Распределение  $V_p$  на северо-западном (а), восточном (б, в) и южном (г, д) участках борта

Гистограмма северо-западного участка имеет ярко выраженную бимодальную форму (рис. 2а). Имеются два пика значений  $V_p$  с интервалами 3.1–3.9 и 5.1–5.7 км/с, соответствующие разным крупным блокам пород, с преобладанием низкоскоростных блоков. В интервале значений  $V_p$  1.7–3.0 км/с график плавно нарастает.

Гистограмма восточного участка также имеет бимодальную форму, но со значительной положительной асимметричностью (рис. 2б). В левой части выделяются значения  $V_p$  1.7–2.4 км/с, в центральной части — 3.0–5.1 км/с. Центральная часть гистограммы на рис. 2б имеет график распределения ближе к статистически нормальному, что свидетельствует об относительно умеренной трещиноватости пород. Сравнение статистических характеристик распределения скоростей продольной волны указывает на большую сохранность приконтурного массива пород западного участка борта. Параметры, представленные в табл. 1, за исключением эксцесса, показывают, что распределение  $V_p$  на западном участке борта (ЗБ) более статистически нормально, чем на восточном (ВБ). Также приведены данные по южному участку борта (ЮБ).

ТАБЛИЦА 1. Статистические параметры распределения  $V_p$ , км/с

Участок	Среднее	Дисперсия выборки	Эксцесс	Асимметричность
ЗБ (2006 г)	4.42	1.58	-0.51	0.19
ВБ, отм. -20 м (2019 г.)	3.90	1.80	-0.30	0.46
ВБ, отм. -140 м (2018 г.)	3.50	1.40	0.25	1.03
ЮБ, отм. +94 м (2018 г.)	4.19	2.56	-0.93	0.36
ЮБ, отм. +70 м (2018 г.)	4.44	2.54	-0.93	0.06

Распределение значений  $V_p$ , измеренных в пределах восточного участка борта на профиле ниже на 120 м, сильно смещено влево от центрального момента и имеет пикообразный вид (рис. 2в), на что указывают асимметричность (1.03) и эксцесс (0.25) (табл. 1). Как видно на рис. 2в, в интервал пониженных значений  $V_p$  2.0–3.8 км/с попадает большинство данных.

Совокупность признаков указывает на сравнительно большую представительность низкоскоростных значений  $V_p$  в массиве анализируемых данных. Это свидетельствует о преобладании нарушенных пород в приконтурной области восточного участка борта, их неоднородном распределении вдоль профиля и, как следствие, меньшей устойчивости относительно западного участка борта в пределах зоны контроля.

Более однородным представляется распределение  $V_p$  на профилях южного участка борта (рис. 2г, д), которые расположены друг под другом на отм. +94 и +70 м. Данный участок литологически однороден, поэтому все статистические параметры практически совпадают, за исключением асимметричности, по которой видно, что на отм. +94 м больше низкоскоростных пород, чем на отм. +70 м. На обеих гистограммах имеется пик значений в интервале 1.7–2.0 км/с, приуроченный к трещиноватым породам на контуре выработки.

Представленные результаты измерения сейсмическим методом в варианте профилирования иллюстрируют геомеханическое состояние приконтурного массива пород, подверженного техногенному воздействию. В пределах зоны контроля и в целом они отражают эффективность применения в качестве экспресс-метода оценки техногенной нарушенности приконтурного массива пород вследствие ведущихся в карьере взрывных работ.

### ИССЛЕДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ

Для периодического контроля участков массива пород в борту карьера привлечен более точный томографический вариант сейсмического метода, работающий на прямых волнах и позволяющий помимо продольных упругих волн, как при профилировании вдоль уступа, записывать поперечные волны.

При анализе упругих характеристик целесообразно больше внимания уделять распределению поперечных волн  $V_s$  и коэффициенту Пуассона  $\nu$ . Скоростная картина на продольных волнах имеет сильную изменчивость из-за влияния обводненности массива, тогда как скорость поперечных волн качественно отражает структуру массива пород. Коэффициент Пуассона показывает уровень сплошности геологической среды. Следовательно, можно делать вывод о естественной трещиноватости массива или степени нарушенности вследствие влияния взрывных работ.

По опыту применения сейсмической томографии на участках борта карьера “Железный”, зона контроля по протяженности вдоль поверхности борта может составлять 200–300 м в длину и 100–120 м в высоту (рис. 3). Геофизический полигон состоит из профилей возбуждения и приема упругих колебаний. Данная схема измерений в карьере “Железный” применялась на восточном и южном участках борта.

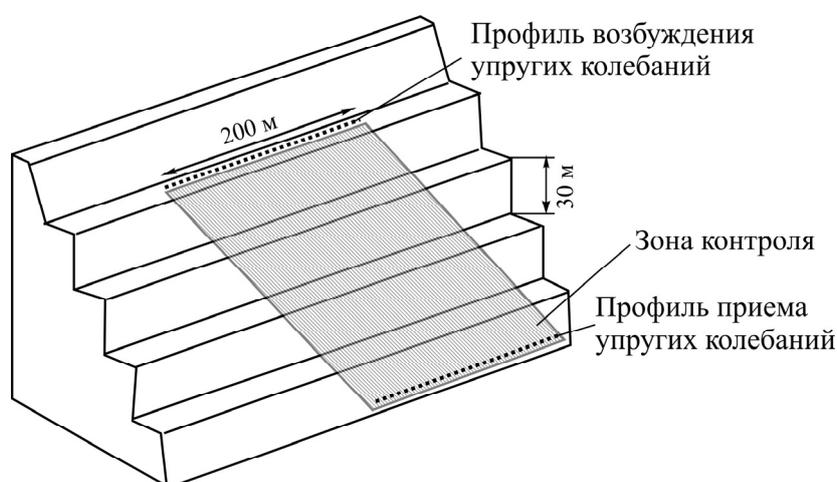


Рис. 3. Схема проведения сейсмотомографических измерений

Необходимость выполнения периодического мониторинга устойчивости восточного борта особенно актуализировалась после обрушения группы уступов, произошедшего в августе 2015 г. в непосредственной близости к зданию рудно-дробильного конвейерного комплекса [10] (рис. 4а). В результате выполнения периодических исследований методом сейсмической томографии, а также аналитических оценок устойчивости сделаны выводы о менее устойчивом состоянии данного участка борта.

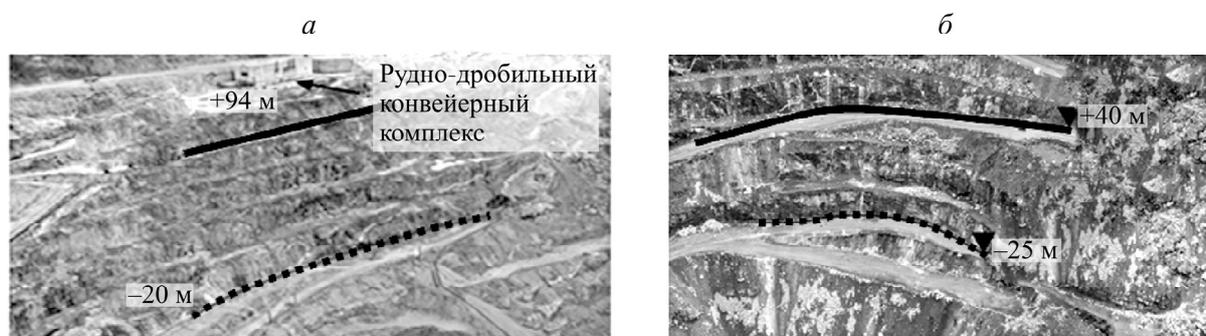


Рис. 4. Геофизический полигон на восточном (а) и южном бортах (б); профили возбуждения упругих колебаний обозначены сплошной линией, приема — штриховой

Актуальность мониторинга южного борта обозначилась осенью 2020 г. после произошедшего обрушения группы уступов вследствие влияния разрывных нарушений в сочетании с взрывными работами, которые способствуют раскрытию трещин (рис. 4б).

Сейсмотомографическими исследованиями получены упругие характеристики прибортового массива пород в пределах геофизического полигона, прилегающего к участку обрушения. Наилучшим образом уровень сплошности (дискретности) геологической среды отражает коэффициент Пуассона  $\nu$ . Оценка относительной устойчивости восточного и южного бортов карьера проведена с помощью статистического метода. Представленные данные основывались на выборке около 20 тыс. значений (табл. 2). Среднее значение  $\nu$  южного борта ниже, а дисперсия указывает на более резкие границы нарушенных пород восточного борта карьера. Распределение значительно отличается от статистически нормального.

ТАБЛИЦА 2. Статистические параметры распределения  $\nu$

Участок	Среднее	Эксцесс	Асимметричность	Дисперсия выборки
Восточный борт	0.385	1.213	-1.340	0.001
Южный борт	0.346	0.331	-1.050	0.008

Эксцесс указывает на то, что коэффициент Пуассона на южном борту статистически имеет более близкое к нормальному распределению. По значению асимметричности видно, что на восточном участке значений  $\nu$  с высокими показателями значительно больше. Об этом свидетельствует и статистический сравнительный анализ распределения  $\nu$  на восточном и южном бортах (рис. 5).

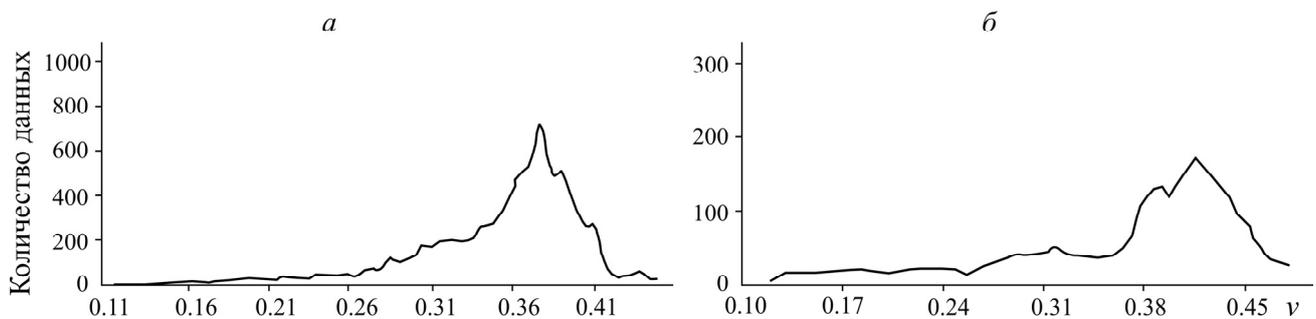


Рис. 5. Распределение коэффициента Пуассона  $\nu$  на восточном (а) и южном бортах (б)

## ВЫВОДЫ

Статистические параметры результатов исследований сейсмическим методом в вариантах профилирования и томографии свидетельствуют о том, что прибортовой массив восточного борта карьера “Железный” в пределах зоны контроля менее устойчив относительно других участков борта. Геофизические методы в целом и сейсмический метод в различных вариациях в частности составляют основу многоуровневого геомеханического мониторинга контурного массива пород в борту карьера “Железный” и могут быть применимы на других месторождениях, обрабатываемых открытым способом, в подобных горно-геологических условиях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каспарьян Э. В., Кожуховский А. В., Розанов И. Ю. Опыт организации мониторинга устойчивости бортов и уступов карьера // Горн. журн. — 2015. — № 5. — С. 67–74.
2. Розанов И. Ю., Ковалев Д. А. Результаты анализа данных радарной системы мониторинга устойчивости борта карьера “Железный” АО “Ковдорский ГОК” // ГИАБ. — 2022. — № 12-1. — С. 122–133.
3. Kozyrev A. A., Rybin V. V., and Konstantinov K. N. Field-scale investigations of the stress field and the excavation damaged zone extent, the Kola Peninsula, Russia, Abstr. 5<sup>th</sup> Jubilee Balkan Mining Congress, Ohrid, Macedonia, 2013. — P. 359–365.
4. Мельников Н. Н., Калашник А. И., Запорожец Д. В., Дьяков А. Ю., Максимов Д. А. Опыт применения георадарных подповерхностных исследований в западной части российского сектора Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2016. — № 1. — С. 39–49.
5. Соловьев Е. Э., Саввин Д. В., Федорова Л. Л. Исследование геокриологических условий массива мерзлых горных пород неразрушающими электромагнитными методами // Горн. журн. — 2019. — № 2. — С. 31–37.
6. Такао Kobayashi, Changwan Sun, and Jin-Hyuck Choi. Near-surface fault investigation by Ground Penetrating Radar (GPR) surveys, J. Geological Society Korea, 2022, Vol. 58, No. 4. — P. 445–455.
7. Епифанова М. В., Федоров С. А., Козырев А. А., Рыбин В. В., Волков Ю. И. Инженерно-геологические аспекты проектирования глубокого карьера Ковдорского ГОКа // Горн. журн. — 2007. — № 9. — С. 30–33.
8. Kozyrev A. A., Kagan M. M., and Chernobrov D. S. Results related pit wall microseismic monitoring (“Zhelezny” mine, Kovdorsky GOK, JSC), Proc. 8<sup>th</sup> Int. Symp. on Rockbursts and Seismicity in Mines, Perm. Min. Inst. RAS, 2013. — P. 501–505.
9. Каспарьян Э. В., Рыбин В. В., Старцев Ю. А. Применение сейсмотомографических исследований для геомеханического мониторинга участка борта карьера // Вестн. КНЦ РАН. — 2011. — № 3 (6). — С. 30–33.
10. Розанов И. Ю., Завьялов А. А. Применение радара IBIS FM для контроля состояния борта карьера рудника “Железный” (АО “Ковдорский ГОК”) // ГИАБ. — 2018. — № 7. — С. 40–46.

*Поступила в редакцию 20/VII 2023*

*После доработки 25/VIII 2023*

*Принята к публикации 15/IX 2023*