

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

**РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА  
ПРИБОРТОВОГО МАССИВА СКАЛЬНЫХ ПОРОД  
НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ  
МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ\***

*Представлены результаты многолетних непрерывных исследований геомеханического состояния массива горных пород геофизическими методами. Приведены результаты определения напряжённо-деформированного состояния, скоростные модели контролируемого сейсмотомаграфическим методом участка борта карьера. Показана важная роль геофизических методов контроля при оценке геомеханического состояния массива пород в борту карьера.*

*Ключевые слова: геомеханика, борт карьера, напряженно-деформированное состояние, геофизические методы, безопасность горных работ.*

---

**В** мировой практике ведения горных работ открытым способом наблюдается устойчивая тенденция увеличения глубины разработки месторождений полезных ископаемых, что зачастую сопровождается необходимостью увеличения генеральных углов наклона бортов карьеров на конечном контуре [1]. Для обеспечения безопасности ведения горных работ и сокращения экономических потерь углы наклона различных участков бортов карьеров на конечном контуре необходимо определять в соответствии с геомеханическим состоянием массива вмещающих горных пород [1—3].

Горный институт Кольского научного центра РАН с 90-х годов прошлого столетия проводит исследования, направленные на обоснование наиболее рациональных конечных контуров действующих и проектируемых рудных карьеров. Важная роль в этих исследованиях принадлежит определению состояния массива пород натурными методами. К настоящему времени накоплен большой опыт в экспериментальных определениях геомеханической ситуации на рудных карьерах Мурманской области [4], наиболее

---

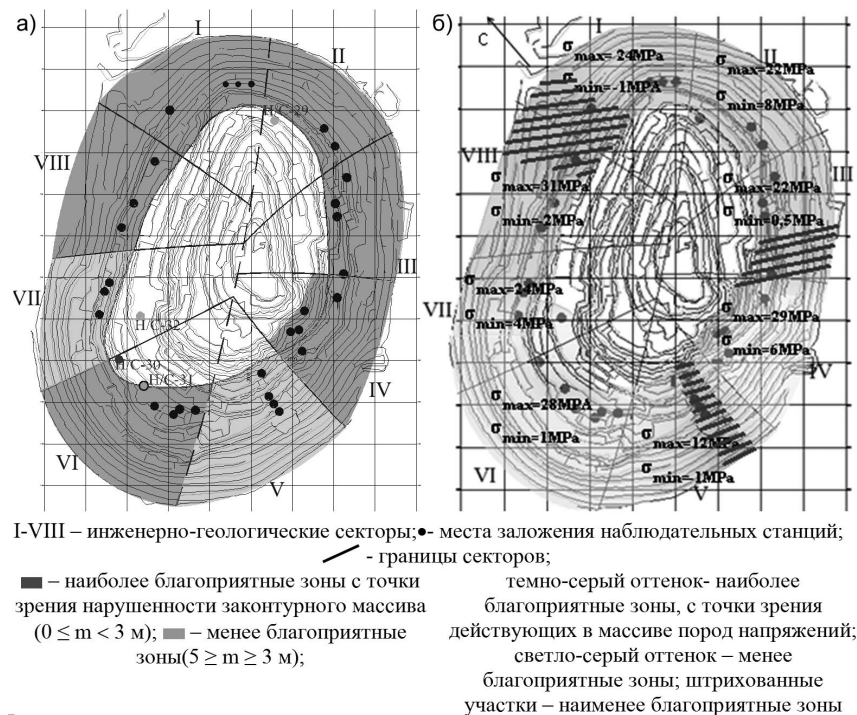
\* Исследования выполнены в рамках гранта по приоритетному направлению деятельности РФФИ «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами» № 14-17-00751.

изученным среди которых представляется карьер рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК». В результате проведённых исследований, выполненных комплексом натурных методов, был сделан вывод о возможности применения уступов с вертикальными углами откосов, и на этой основе — формирования борта карьера новой конструкции [1]. В подобных условиях для обеспечения безопасности горных работ необходимо вести непрерывный контроль геомеханического состояния прибортовой части карьера комплексом экспериментальных методов, среди которых наиболее эффективными являются метод разгрузки, сейсмическая томография и ультразвуковой метод.

С 2000–2012 гг. достаточно полно изучен борт карьера, поставленный на конечный контур в интервале горизонтов ориентировочно +170 ÷ +10 м [5]. Важно отметить, что на протяжении этого периода все исследования выполнялись параллельно с углублением формирующегося конечного контура борта. К периоду 2013–2014 гг. развитие горных работ, а соответственно и формирование конечного контура активизировались на глубинных горизонтах карьера, вследствие чего основное внимание при натурных исследованиях геомеханического состояния прибортового массива пород также было уделено глубинным горизонтам карьера (ниже нулевой отметки).

Результаты районирования карьера по мощности нарушенной зоны и уровню действующих в прибортовом массиве пород напряжений показывают (рис. 1), что в обоих случаях зоны пониженной устойчивости уступов и участков борта выделяются в юго-восточной и юго-западной частях карьера.

В то же время районирование карьерного поля по уровню действующих напряжений позволяет выделить в качестве потенциально неустойчивых участков небольшие зоны на восточном и северо-западном участках борта карьера, которые не выделяются по критерию мощности нарушенной зоны. Это отличие свидетельствует о том, что величины действующих напряжений более чувствительны к изменению геомеханического состояния прибортового массива. Возможно также, что величины напряжений являются более стабильными показателями геомеханической ситуации, чем мощность нарушенной зоны, которая может существенно меняться со временем. Поэтому анализ геомеханического состояния прибортового массива по двум критериям в конечно счете повышает в целом надёжность прогноза геомеханического состояния участков борта карьера.



**Рис. 1. Районирование карьера рудника «Железный» по мощности нарушенной зоны (а) и по величинам действующих напряжений (б) с учетом геолого-структурных особенностей строения массива горных пород**

Наряду с скважинными изучениями действующих в приконтурном массиве пород напряжений и нарушенности в последнее время приобрела особую актуальность задача геофизического контроля геологической среды в массиве пород на выявленных потенциально неустойчивых участках борта карьера, требующих особого внимания и контроля. Одним из современных способов является сейсмический метод, который позволяет получить интегральную картину состояния достаточно большого участка геологической среды и отслеживать его динамику в процессе развития горных работ. Сейсмический метод позволяет определить структуру массива, которая существенно влияет на его НДС, выявить высокопрочные и ослабленные участки не только на контуре выработки, но и в глубине массива. Ранее сейсмический метод зарекомендовал уже себя как эффективный способ оценки и контроля геомеханической ситуации при ведении горных работ [6, 7, 8].

Испытания сейсмического метода в варианте сейсмического профилирования (возбуждение и приём упругих колебаний осуществляется вдоль общего профиля) ранее проводились на стационарном полигоне северо-западного участка борта карьера рудника «Железный» посредством ежегодных измерений на протяжении 5 лет [9]. В результате в качестве основных факторов, влияющих на величины скоростей прохождения упругих волн в массиве, определены экзогенный (обводненность) и техногенный.

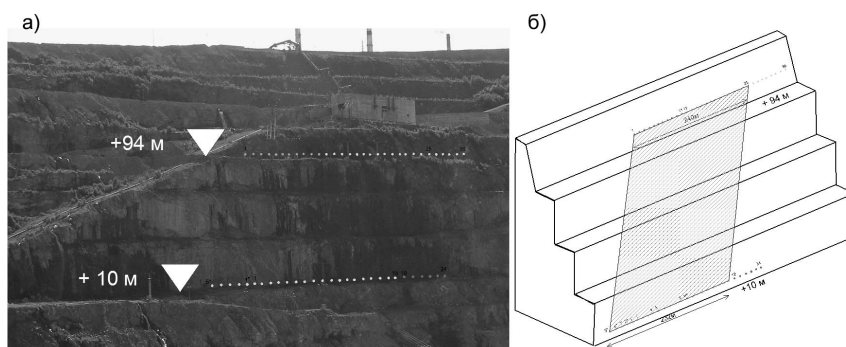
С целью оперативного получения динамических упругих характеристик приконтурного массива пород в восточном участке борта в 2014 году был заложен стационарный геофизический полигон, измерения на котором выполняются в варианте сейсмомографии. Актуальность данного участка борта была обозначена в 2012 году, когда микросейсмической системой [10] в массиве пород юго-восточного участка борта была зафиксирована активизация сейсмической активности в зоне параллельных сближенных трещин, образующих плоскость ослабления, которая по параметрам залегания относительно конечного контура карьера может представлять опасность с точки зрения устойчивости группы уступов восточной части борта в целом.

Геофизический полигон заложен в июле 2014 года и состоит из профилей возбуждения и приёма упругих колебаний на гор. +94 м и на гор. +10 м соответственно (рис. 2), располагаясь ниже здания рудно-дробильного конвейерного комплекса, расположенного на отметке +120 м.

Контролируемый участок сложен в основном пироксенитами с включением крупных тел карбонатитов, левая часть участка сложена карбонат-тетрафлогопит-тремолитовыми породами, этот участок пересекает несколько крупных трещин. На рис. 2, а видно, что этот участок массива сильно обводнён, особенно в правой и центральной частях.

Измерения проводились с помощью 24-канальной инженерной сеймостанции SmartSeis. Возбуждение сейсмических сигналов осуществлялось с помощью удара кувалды весом 6 кг. Обработка сейсмических данных выполнена с помощью специализированной программы «ХТomo-LM». В результате к настоящему времени выполнено 3 цикла измерений.

На рис. 3 показаны результаты восстановления скоростей продольных волн в исследуемом массиве (скоростная модель). При этом следует иметь в виду, что по оси ординат за ноль принята отметка репера 5', все реперы находятся на контуре уступа на высоте 1,5–2 м от его подошвы. Для лучшей наглядности рисунки



**Рис. 2. Геофизический полигон на восточном участке борта:** а – фотомонтаж исследуемого участка массива пород, б – схема проведения сейсмотомографических измерений

имеют одинаковый масштаб и совмещены друг с другом. По результатам работ первого цикла измерений, выполненного 14 октября 2014 года, на рис. 3, а (см. Приложение, с. 447) видно, что наблюдаемый участок характеризуется высокой неоднородностью скоростной модели, величины  $V_p$  изменяются в интервале от 3 до 7,6 км/с.

По результатам исследований первого цикла можно выделить три скоростные зоны, которые отражают особенности геолого-структурного строения участка:

- 1)  $V_p = (3 \div 4)$  км/с – в верхней части исследуемого участка, приуроченные к крупным телам карбонатитов в пироксенитах;
- 2)  $V_p = (3,8 \div 4,6)$  км/с – в левой и краевой частях массива, приуроченных к карбонат-тетрафлогопит-тремолитовыми породам;
- 3)  $V_p = (4,8 \div 6,6)$  и  $(6,6 \div 7,6)$  км/с – в центральной и краевой частях массива, приуроченные к пироксенитам разной степени нарушенности или различного состава.

Подбор маркирующих изолиний выполняли с учетом характера скоростной модели, априорной информации о геолого-тектоническом строении участка (структурная модель), а также по данным о параметрах физических свойствах пород. В результате исследования первого цикла позволили определить начальное (исходное) состояние массива пород в исследуемом участке борта карьера.

Измерения, выполненные в июне 2015 года показали значительные изменения в скоростной модели как по конфигурации изолиний, так и по величинам скоростей продольных волн, причем наибольшие изменения скоростей произошли в центральной и



**Рис. 4. Участок сейсмотомаграфического полигона на отметке +10 м, 24.09.2015 г.**

правой частях массива в пределах полигона: на отдельных участках значения скоростей продольных волн выросли, а на других уменьшились (рис. 3, б). На данном этапе такая контрастность изменения может быть связана с относительным уменьшением обводненности приконтурного массива пород, отмеченного при втором цикле измерения.

Третий цикл измерений выполнен 24 сентября 2015 года и по скоростям распространения продольных волн в качестве основных факторов, влияющих на геомеханическое состояние массива пород на контролируемом участке, выступают гидрологический и техногенный. Водоприток в правой части полигона во время измерений третьего цикла значительно увеличился относительно второго, что хорошо иллюстрируется фотографией, сделанной на нижнем профиле полигона на отметке +10 м (рис. 4).

Сравнивая результаты измерений на первом и третьем циклах (рис. 3 а, в), когда гидрологические условия были схожие (высокая обводненность массива), в конфигурации изолиний наблюдается закономерность. Наблюдаемый участок характеризуется высокой неоднородностью скоростей распространения продольных упругих волн  $V_p$ , которые изменяются в интервале от 3 до 7,6 км/сек.

Отчётливо выделяются зоны с высокой трещиноватостью пород, приуроченные к низким скоростям продольных волн. Однако, вода, являясь хорошим порозаполнителем, при определенных условиях способствует увеличению скоростей продольных волн. В сухом трещиноватом массиве напротив наблюдаются более низкие величины скоростей продольных волн. Такая закономерность наблюдается для трещин с раскрытием 0,1÷1 мм. При раскрытии трещин больше 1 мм наблюдается обратная закономерность.

Данное предположение хорошо отражено на разностной скоростной модели (рис. 5, см. Приложение, с. 447), где отражена динамика изменения скоростного поля во времени между циклами измерений. Видно, что на отдельных участках произошла смена

знака динамики с положительного на отрицательный и наоборот. Например, на участке массива пород в правой части полигона произошла смена знака динамики с (+) на (-), а массив пород здесь из относительно сухого стал обводнённым. Следуя вышесказанному можно предположить, что этот участок сильнотрещиноват с раскрытием трещин больше 1 мм. На других участках, например, по центру ближе к профилю на отметке +10 м произошла смена знака динамики с (-) на (+), то есть породы на этом участке также трещиноватые, но раскрытие трещин не более 1 мм.

На рис. 5, в показана динамика изменения состояния массива между третьим и первым циклами, где наблюдались схожие, но не идентичные, гидрогеологические условия. Поэтому влияние обводнённости на изменение скоростей имеется, но не столь значительное. Чётко прослеживается диагональная зона пониженных величин скоростей продольных волн, что вероятно связано с прохождением сигнала в непосредственной близости к нижней бровке на гор.+30 м и +70 м и область в правой части массива, где произошло уменьшение скоростей продольных волн до 2,5 км/сек. Эта же область присутствует и на рис. 5, б. Опираясь на динамику изменения скоростей на рис. 5, б, в можно сделать вывод, что на участке контролируемого массива в правой части полигона процесс трещинообразования интенсифицировался и требует особого внимания и контроля. В левой верхней части исследуемого массива скорости продольных волн приросли до 2,5 км/сек. Очевидно, что здесь массив трещиноватый, но находится в стабильном состоянии, а изменение скоростного поля связано с гидрогеологическим состоянием.

Периодические исследования сейсмотомаграфическим методом позволяют оценить динамику геомеханических процессов, которая определяется не только гидрогеологическими условиями, но и нарушенностью приконтурной части массива. Дальнейшие периодические исследования на этом участке позволят проводить мониторинговые наблюдения для изучения динамики развития процессов и ранжировать массив по степени трещиноватости.

Опыт применения методов геоконтроля при геомеханической оценке состояния геологической среды показывает их важную роль при разработке рекомендаций по обеспечению устойчивости бортов карьеров, свидетельствует об эффективности их использования на локальных участках борта карьера для оперативного контроля с целью прогноза катастрофических последствий в случае потери устойчивости уступов или групп уступов.

---

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мельников Н.Н., Козырев А.А., Решетняк С.П., Каспарьян Э.В., Рыбин В.В., Мелик-Гайказов И.В., Свинин В.С., Рыжков А.Н. Концептуальные основы оптимизации конструкции бортов карьеров Кольского полуострова в конечном положении. // Труды 8-го международного симпозиума «Горное дело в Арктике», Санкт-Петербург: изд. «Типография Иван Фёдоров», — 2005. — с. 2–14.
2. Козырев А.А., Рыбин В.В., Константинов К.Н. Оценка геомеханического состояния законтурного массива горных пород в борту карьера комплексом инструментальных методов // ГИАБ №10, М., 2012, — С. 113–119.
3. Яковлев А.В., Ермаков Н.И. Устойчивость бортов рудных карьеров при действии тектонических напряжений в массиве. — Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2006. — 231 с.
4. Kozыrev, A.A., Rybin, V.V., Konstantinov, K.N. Field-Scale Investigations of the Stress Field and the Excavation Damaged Zone Extent, the Kola Peninsula, Russia // Book of Abstracts of 5th Jubilee Balkan Mining Congress, 18–21 September 2013, Ohrid, Macedonia, 2013, pp. 359–365.
5. Панин В.И., Рыбин В.В., Константинов К.Н., Старцев Ю.А., Данилкин А.А., Кожуховский А.В. Контроль геомеханической ситуации в борту карьера геофизическими методами // ГИАБ. — 2013. — № 4. — С. 279–285.
6. Козырев А.А., Рыбин В.В., Жиров Д.В., Билин А.Л., Виноградов А.Н., Каспарьян Э.В., Виноградов Ю.А, Семенова И.Э., Жирова А.М. Методические основы технологии эффективного и безопасного освоения глубоких горизонтов месторождений полезных ископаемых открытым способом // Вестник МГТУ, 2009, том 12, №4, с. 644–653.
7. Сейсмическая томография. С приложениями в глобальной сейсмологии и разведочной геофизике. — М.: Мир, 1990.
8. Панин В.И., Старцев Ю.А. Изучение процессов эволюции геологической среды методами сейсмической томографии при ведении горных работ // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. — Новосибирск: ИГД, 2008. С. 142–146.
9. Каспарьян Э.В., Рыбин В.В., Старцев Ю.А. Применение сейсмотомографических исследований для геомеханического мониторинга участка борта карьера // Вестник Кольского научного центра РАН, 2011. № 3. С. 31–34.
10. Каган М.М., Козырев А.А. Особенности сейсмического режима массива горных пород в приконтурной зоне карьера // тез. докл. VIII Междунар. школа-семинар «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород», 24–29 мая 2010. — С. 42. **ГИАБ**

---

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Рыбин Вадим Вячеславович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник,

Панин Виктор Иванович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник,



Константинов Константин Николаевич – младший научный сотрудник,  
Старцев Юрий Алексеевич – ведущий технолог,  
Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук.



---

UDC 622.831

## **RESULTS OF GEOMECHANICAL MONITORING OF HOST HARD ROCK MASS ON THE BASIS OF GEOPHYSICAL RESEARCH METHODS**

Rybin V.V., Ph.D. (Eng.), Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Russia,  
Panin V.I., Ph.D. (Eng.), Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Russia,  
Konstantinov K.N., Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Russia,  
Startsev Y.A., Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Russia.

---

*The paper presents findings of long-term continuous geophysical research of the rock mass mechanics state. The results are given of stress-strain state determination, velocity models of the open pit wall section monitored by the seismic-tomographic method. An important part of geophysical control methods is shown during rock mechanics state assessment in the open pit wall.*

*Key words: rock mechanics, open pit wall, stress-strain state, geophysical methods, mining safety.*

### **REFERENCES**

1. Mel'nikov N.N., Kozyrev A.A., Reshetnjak S.P., Kaspar'jan Je.V., Rybin V.V., Melik-Gajkazov I.V., Svinin V.S., Ryzhkov A.N. *Konceptual'nye osnovy optimizacii konstrukcii bortov kar'erov Kol'skogo poluostrova v konechnom polozenii* (Conceptual foundations of optimization of construction of pit walls of the Kola Peninsula in the end position) // Trudy 8-go mezhdunarodnogo simpoziuma «Gornoe delo v Arktike», Sankt-Peterburg: izd. «Tipografija Ivan Fjodorov», 2005. Pp. 2–14.
2. Kozyrev A.A., Rybin V.V., Konstantinov K.N.. *Ocenka geomechanicheskogo sostojanija zakonturnogo massiva gornyh porod v bortu kar'era kompleksom instrumental'nyh metodov* (Konstantinov. Assessment of geomechanical state of the edge of the rock massif in the mine complex instrumental methods) // GIAB No 10, Moscow, 2012, Pp. 113–119.
3. Jakovlev A.V., Ermakov N.I. *Ustojchivost' bortov rudnyh kar'erov pridejstvii tektonicheskikh naprjazhenij v massive* (The stability of the sides of the ore quarries pricastie tectonic stresses in the array). Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 2006. 231 p.
4. Kozyrev, A.A., Rybin, V.V., Konstantinov, K.N. *Field-Scale Investigations of the Stress Field and the Excavation Damaged Zone Extent, the Kola Peninsula, Russia* (Field-Scale Investigations of the Stress Field and the Excavation Damaged Zone Extent, the Kola Peninsula, Russia) // Book of Abstracts of 5th Jubilee Balkan Mining Congress, 18–21 September 2013, Ohrid, Macedonia, 2013, pp. 359–365.

5. Panin V.I., Rybin V.V., Konstantinov K.N., Starcev Ju.A., Danilkin A.A., Kozhuhovskij A.V. *Kontrol' geomechanicheskoj situacii v borte kar'era geofizicheskimi metodami* (Monitoring of geomechanical situation in the open pit by geophysical methods) // GIAB. 2013. No 4. pp. 279–285.

6. *Metodicheskie osnovy tehnologii jeffektivnogo i bezopasnogo osvoenija glubokih gorizontov mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh otkrytym sposobom* (Methodological framework for the efficient and safe development of deep horizons of mineral deposits by open method) / A.A. Kozyrev, V.V. Rybin, D.V. Zhiron, A.L. Bilin, A.N. Vinogradov, Je.V. Kaspar'jan, Ju.A. Vinogradov, I.Je. Semenova, A.M. Zhirona // Vestnik MGTU, 2009, V. 12, No4, Pp. 644–653.

7. *Sejsmicheskaja tomografija. S prilozhenijami v global'noj sejsmologii i razvedochnoj geofizike* (Seismic tomography. With applications in global seismology and exploration Geophysics). Moscow: Mir, 1990.

8. Panin V.I., Starcev Ju.A. *Izuchenie processov jevoljucii geologicheskoy sredy metodami sejsmicheskoy tomografii pri vedenii gornyh rabot* (Study of the processes of evolution of geological environment by seismic imaging in mining) // Geodinamika i naprjazhennoe sostojanie neдр Zemli. Novosibirsk: IGD, 2008. Pp. 142–146.

9. Kaspar'jan Je.V., Rybin V.V., Starcev Ju.A. *Primenenie sejsmotomograficheskikh issledovanij dlja geomechanicheskogo monitoringa uchastka borta kar'era* (Use of seismic tomography studies for geomechanical monitoring site pit) // Vestnik Kol'skogo nauchnogo centra RAN, 2011. No 3. Pp. 31–34.

10. Kagan M.M., Kozyrev A.A. *Osobennosti sejsmicheskogo rezhima massiva gornyh porod v prikonturnoj zone kar'era* (Peculiarities of the seismic regime of the rock massif in contour area career) // tez. dokl. VIII Mezhdunar. shkola-seminar «Fizicheskie osnovy prognozirovaniya razrushenija gornyh porod», 24–29 maja 2010. Pp. 42.