

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

МОНИТОРИНГ МИГРАЦИИ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ УЧАСТКОВ В БОРТУ КАРЬЕРА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЕГО УСТОЙЧИВОСТИ*

Представлены результаты контроля геомеханического состояния массива пород в приконтурной зоне крупного рудного карьера, расположенного на севере-западе Российской Федерации, с использованием метода сейсмической томографии. Выполнен анализ скоростных моделей, полученных в различные климатические сезоны. Выявлены зависимости изменения характера этих моделей от степени обводнённости и трещиноватости массива пород, что существенно влияет на устойчивость уступа и борта. Даны рекомендации по сохранению устойчивости прибортовой части карьера в районе расположения ответственного сооружения. Ключевые слова: геомеханика, геофизика, сейсмотомография, скоростная модель, карьер, борт.

Мировая практика ведения открытых горных работ последних лет свидетельствует об интенсивном росте глубины карьеров [1, 2]. При этом параметры отработки претерпевают существенные изменения в сторону увеличения высоты уступов, углов их наклона, уменьшения ширины берм, что в целом направлено на увеличение генерального угла наклона борта [3]. При этом для обеспечения безопасного ведения горных работ углы наклонов различных участков борта необходимо определять в соответствии с геомеханической ситуацией в массиве пород на актуальном участке [3–5].

С начала 1990-х годов Горный институт КНЦ РАН проводит исследования по обоснованию рациональных углов наклонов бортов карьеров. К настоящему времени накоплен большой опыт в области исследования геомеханического состояния массивов пород на крупных рудных карьерах Мурманского горно-

* Исследования выполнены в рамках гранта по приоритетному направлению деятельности РФ «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами» № 17-17-01302.

промышленного комплекса, среди которых карьеры Центрального и Восточного рудников АО «Апатит», карьер «Олений ручей» АО «Северо-западная фосфорная компания», карьер рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК». Среди перечисленных выше карьеров последний является наиболее изученным [3]. В связи с применением на этом карьере достаточно крутых углов наклона уступов, вплоть до вертикальных и, соответственно, повышенных генеральных углов наклона борта, ведение непрерывного мониторинга устойчивости является обязательным условием для обеспечения безопасности горных работ.

Необходимо отметить, что на протяжении последних лет проведен большой объем исследований, который позволил выполнить районирование карьерного поля по уровню действующих напряжений и мощности нарушенной зоны, при этом повышенная вероятность нарушения устойчивости уступов и отдельных участков массива прогнозируется на восточном участке борта карьера [6]. Помимо этого на основе систематизации данных по физическим свойствам, структурной нарушенности, действующим напряжениям и деформациям массива пород была выполнена оценка устойчивости восточного участка борта карьера с учетом влияния обводненности массива пород и без него. В результате анализа полученных результатов установлено, что обводненность массива снижает значение коэффициента запаса устойчивости от 20 до 25% для генеральных углов откоса борта карьера в массиве прочных скальных пород и от 7% до 27% в разломных зонах. Для контроля устойчивости применяется комплекс экспериментальных методов, таких как сейсмический, ультразвуковой, метод разгрузки и другие. В настоящей статье приведены результаты применения метода сейсмической томографии для контроля устойчивости ответственного участка борта карьера.

Сейсмотомографический метод зарекомендовал себя как достаточно эффективный способ оценки и контроля геомеханической ситуации при ведении горных работ [7–9]. С середины 2000-х гг. ежегодные измерения проводились на северо-западном участке борта карьера, по результатам которых установлено, что основными факторами, определяющими характер скоростной модели, являлись обводненность и трещиноватость, преимущественно техногенная [10].

Ввиду особой ответственности участка борта карьера в районе расположения рудного дробильно-конвейерного комплекса со стороны восточного участка борта (гор. +120 м) в середине 2014 г. заложен стационарный полигон, который состоит

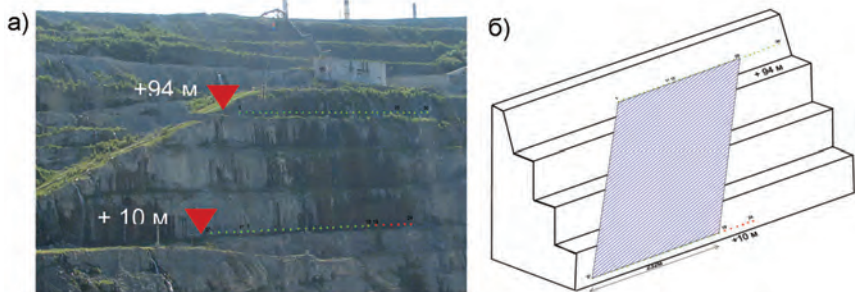


Рис. 1. Геофизический полигон на восточном участке борта: фотомонтаж исследуемого участка массива пород (а); схема проведения сейсмотомографических измерений (б)

из профилей возбуждения и приема упругих колебаний на гор. +94 м и на гор. +10 м соответственно (рис. 1).

Контролируемый участок сложен в основном пироксенитами с включением крупных тел карбонатитов. Левая часть участка сложена карбонат-тетрафлогопит-тремолитовыми породами и пересекается несколькими крупными трещинами. На рис. 1, а видно, что этот участок массива сильно обводнен, особенно в правой и центральной частях.

Измерения проводили 24-канальной инженерной сейсмостанцией «SmartSeis», обработку результатов выполняли специализированной программой «ХТомо-LM». К настоящему времени выполнено 6 циклов измерений.

На рис. 2 скоростные модели (по продольным волнам) в контролируемом участке массива. При этом по оси ординат за ноль принята отметка репера 5', все реперы находятся на контуре уступа на высоте 1,5 м – 2 м от его подошвы. Для лучшей наглядности рисунки имеют одинаковый масштаб и совмещены друг с другом.

По результатам исследований первого цикла (рис. 2, а) можно выделить три скоростные зоны, которые отражают особенности геолого-структурного строения участка.

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. Результаты исследования первого цикла позволили определить начальное (исходное) состояние массива пород в исследуемом участке борта карьера.

Измерения, выполненные в конце июня 2015 г. (второй цикл, рис. 2, б) 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 правой частях массива в пределах полигона: на отдельных участках значения скоростей продольных волн выросли, а на других уменьшились. 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 в конце сентября 2015 г. (рис. 2, в). Скоростная модель относительно второго этапа претерпела значительные изменения, что, вероятно, связано с увеличением водопритока в правой части контролируемого массива, что хорошо иллюстрируется фотографией, сделанной на нижнем профиле полигона на отметке +10 м (рис 3).

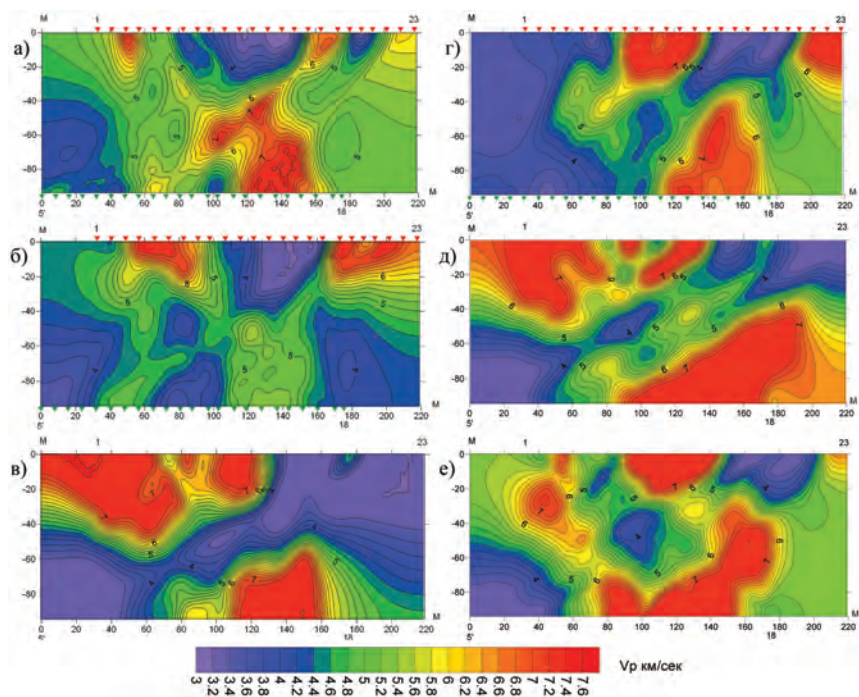


Рис. 2. Скоростная модель исследуемого участка: 1 цикл – 14.10.2014 г. (а); 2 цикл – 26.06.2015 г. (б); 3 цикл – 24.09.2015 г. (в); 4 цикл – 17.05.2016 г. (г); 5 цикл – 11.07.2016 г. (д); 6 цикл – 29.09.2016 г. (е)



Рис. 3. Участок сейсмотомографического полигона на отметке +10 м, 24.09.2015 г.

Четвертый цикл проведен в мае 2016 г. (рис. 2, *з*). На волновой картине отчетливо выделяется правая часть участка, где скорости продольных волн составляют до 7 км/с. Связано это прежде всего с тем, что в это время исследуемый участок был сильно обледенен, о чем свидетельствует фотография сделанная в этот период (рис. 4). Для левой части картины характерны низкие скорости (до 3 км/с), где большая часть льда уже оттаяла.

Пятый цикл измерений проводили в начале июля 2016 г. (рис. 2, *д*). Полученные результаты схожи с третьим циклом, выполненном в сентябре 2015 г. Тем не менее, в нижней правой части картины наблюдается увеличение скорости продольных волн, что может свидетельствовать об уменьшении водопритока и более сухом состоянии всего массива по сравнению с предыдущим циклом.

Заключительный (шестой) цикл выполнен в конце сентября 2016 г. (рис. 2, *е*). При сравнении результатов двух последних цик-



Рис. 4. Фотопанорама зоны контроля сейсмотомографического полигона в период 4-го цикла измерений

лов отчетливо видно уменьшение скоростей продольных волн, практически по всему полю скоростной модели. Тем не менее, сохраняется высокая неоднородность величин скоростей. Уменьшение скоростей продольных волн связано с увеличением водопритоков на данном участке в это время года, а так же с увеличением степени трещиноватости в краевых зонах.

Кроме того, в результате значительного снижения фоновых шумов, связанных с работой дробильного комплекса и конвейера, на двух последних этапах получены сейсмические записи не только продольных V_p , но и поперечных V_s волн (рис. 5), что в свою очередь позволило рассчитать и проследить динамику изменения упругих характеристик горных пород. Поскольку волны V_s более чувствительны к структурным изменениям в породах, то с высокой достоверностью можно предположить, что низкоскоростные зоны волн V_s связаны как с осушением-обводнением участка исследований, так и с высокой трещиноватостью пород.

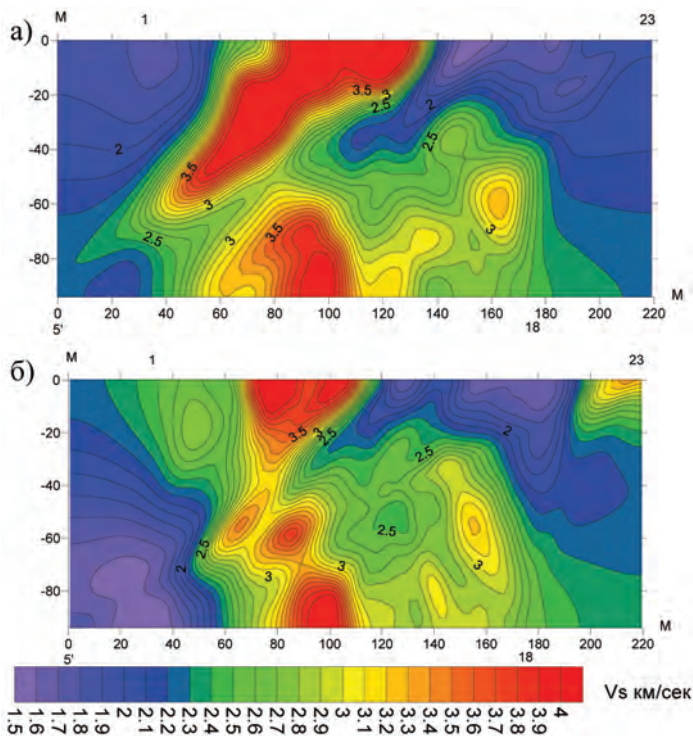


Рис. 5. Скоростная модель исследуемого участка. Поперечные волны: 11.07.2016 г. (а); 29.09.2016 г. (б)

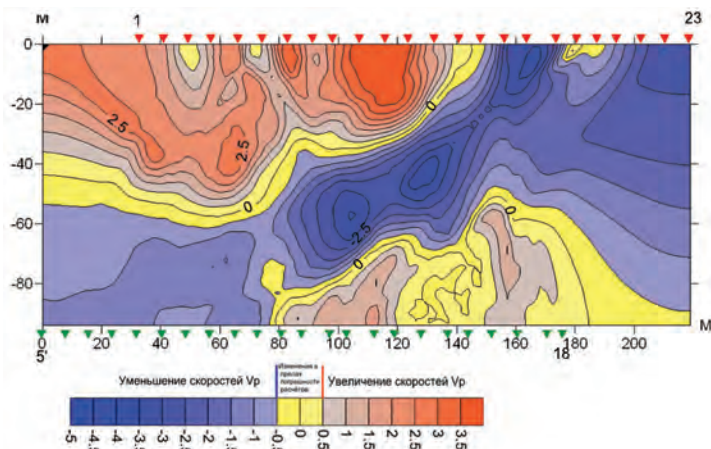


Рис. 6. Разностные скоростные модели продольных волн участка массива: 3 цикл (24.09.2015) – 1 цикл (14.10.2014)

Сравнение результатов измерений по всем циклам показывает, что в период роста водопритоков величины скоростей снижаются. Однако влияние обводненности на скорость упругих волн неоднозначно. Вода, улучшая акустические контакты, при определенных условиях, преимущественно для трещин с раскрытием $0,1 \div 1$ мм способствует увеличению скоростей V_p . В сухом трещиноватом массиве, напротив, наблюдаются более низкие величины скоростей V_p .

Для наглядности на рис. 6 приведена разностная модель скоростных картин 3 и 1 цикла, где отражена динамика изменения скоростного поля во времени. Видно, что на отдельных участках произошла смена знака динамики изменения скоростей с положительного на отрицательный и наоборот. Например, на участке массива пород в правой части полигона произошла смена знака с (+) на (-), а массив пород здесь из относительно сухого стал обводненным. На основании вышесказанного можно предположить, что этот участок сильно трещиноват 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.

Для большей информативности сейсмотомографического метода построены модели распределения коэффициента Пуассона μ в пределах зоны контроля, рассчитанная по величинам V_p и V_s для 5 и 6 циклов измерений (рис. 7).

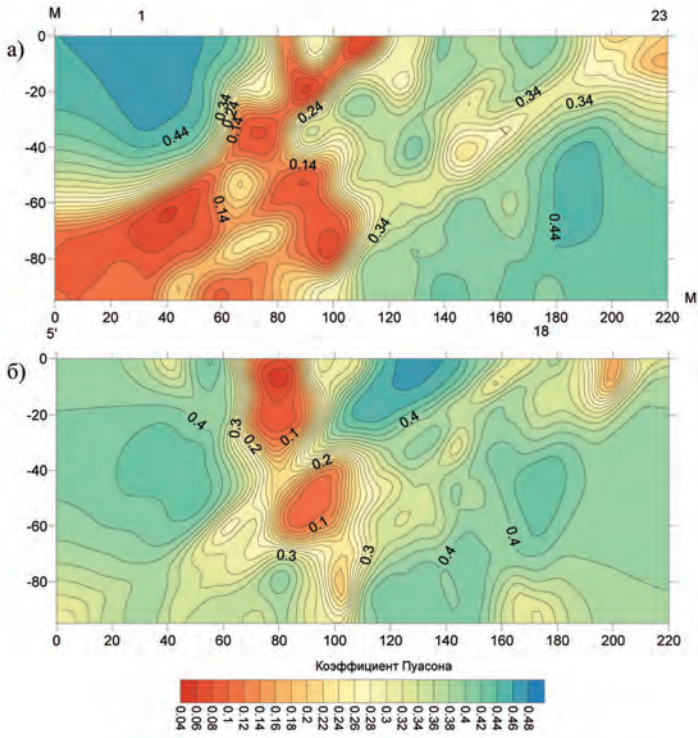


Рис. 7. Картина распределения коэффициента Пуассона: 5 цикл (11.07.2016) (а); 6 цикл (29.09.2016) (б)

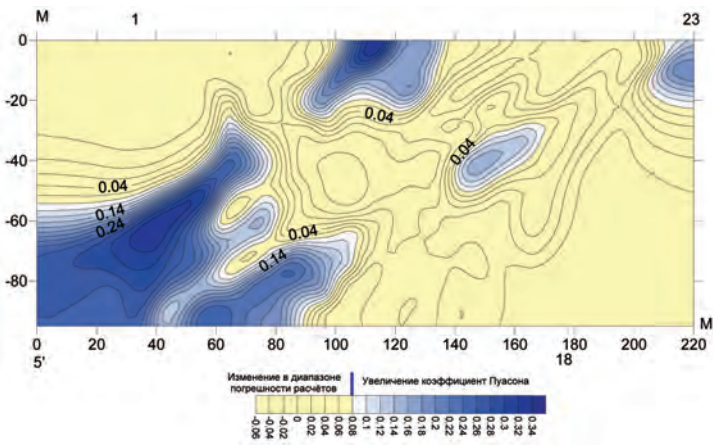


Рис. 8. Динамика изменения (разностная картина) коэффициента Пуассона между 5 (29.09.2016) и 6 (11.07.2016) циклами

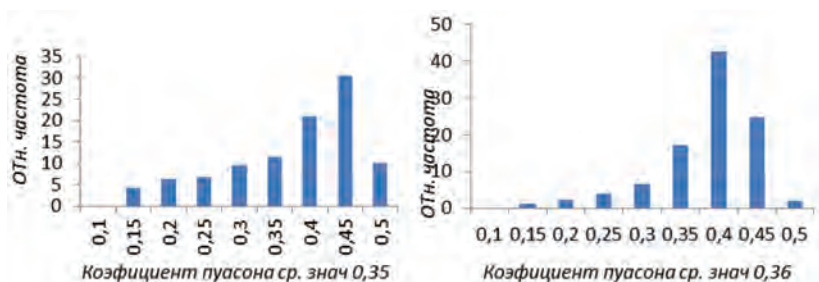


Рис. 9. Гистограммы коэффициента Пуассона: 5 цикл (11.07.2016) (а); 6 цикл (29.09.2016) (б)

Повышенные значения коэффициента Пуассона характеризуют степень ослабления структурных связей и повышение трещиноватости в массиве пород.

На рис. 8 показана динамика изменения коэффициента Пуассона между 5-ым и 6-ым циклами, полученная разностным способом.

Сравнение данных на рис. 7 и 8 показывает более контрастные изменения величин коэффициента Пуассона между пятым и шестым циклами измерений, что свидетельствует о большой чувствительности этого параметра к динамике состояния контролируемого участка. На отдельных участках произошло значительное увеличение этого показателя, в среднем до 0,2. Однако эти области незначительны по площади. Для всего массива увеличение значений μ достигает примерно 10%, что видно из гистограммы на рис. 9. Распределения имеют асимметрию в сторону больших значений, что характеризует весь массив как достаточно трещиноватый.

Таким образом притоки воды в массиве скальных пород совместно с сезонными факторами заморозки и оттаивания способствуют активному протеканию процесса раскрытия трещин и вымыванию материала заполнителя из их плоскостей, что в общем итоге ухудшает геомеханическое состояние массива пород, и, как следствие, снижает общую устойчивость массива пород.

Для сохранения устойчивого состояния массива пород необходимо замедлить процессы выветривания массива: уменьшить количество сбрасываемых технических вод на поставленные в предельные состояния участки борта карьера; отводить существующие естественные подпритоки; проводить мероприятия по дренажному осушению обводненных участков путем бурения осушающих скважин.

В целом по результатам исследований можно сделать следующие выводы.

1. Величины скоростей продольных волн в массиве пород исследуемого участка варьируют с течением времени и находятся в пределах от 0 км/с до 7,6 км/с.

2. В трещинах с раскрытием предположительно 0,1–1 мм вода улучшает акустическую проводимость, что приводит к увеличению скоростей V_p . Лед в массиве пород так же улучшает акустические контакты, что способствует увеличению скоростей V_p .

3. Сезонные циклы заморозки/оттаивания совместно с потоками воды в массиве пород негативно влияют на общее геомеханическое состояние массива пород и способствуют раскрытию трещин в скальном массиве, что в конечном итоге приводит к ухудшению ситуации.

4. Для поддержания устойчивого состояния уступов и участков борта карьера необходимо применять методы ограничения и снижения водопритоков: уменьшать количество сбрасываемых технических вод на поставленные в предельные состояния участки борта карьера; отводить существующие естественные водопритоки; проводить мероприятия по дренажному осушению обводненных участков путем бурения осушающих скважин.

Авторы выражают благодарность сотрудникам АО «Ковдорский ГОК» за помощь в организации и проведении исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мельников Н. Н., Козырев А. А. Изменение геодинамической среды при ведении крупномасштабных горных работ на глубоких карьерах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – Отдельные статьи (специальный выпуск 56). – № 11. – С. 7–23.

2. Stacey T. R., Xianbin Y., Armstrong R., Keyter G. J. New slope stability considerations for deep open pit mines // The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003, pp. 373–390.

3. 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». – СПб.: Типография Иван Федоров, 2005. – С. 2–14.

4. Козырев А. А., Рыбин В. В., Константинов К. Н. Оценка геомеханического состояния законтурного массива горных пород в борту карьера комплексом инструментальных методов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 10. – С. 113–119.

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

6. Рыбин В. В., Панин В. И., Константинов К. Н., Старцев Ю. А. Результаты геомеханического мониторинга прибортового массива скальных пород на основе использования геофизических методов исследования // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — Отдельные статьи (специальный выпуск 56). — № 11. — С. 193–200.

7. 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. — т. 12. — № 4. — С. 644–653.

8. Сейсмическая томография. С приложениями в глобальной сейсмологии и разведочной геофизике. — М.: Мир, 1990. — 415 с.

9. 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.

10. 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. **ИДБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Рыбин Вадим Вячеславович*¹ — кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник,
e-mail: rybin@goi.kolasc.net.ru,

*Панин Виктор Иванович*¹ — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник,

*Константинов Константин Николаевич*¹ — младший научный сотрудник, e-mail: const@goi.kolasc.net.ru,

*Старцев Юрий Алексеевич*¹ — ведущий технолог,

*Калужный Антон Сергеевич*¹ — младший научный сотрудник
e-mail: anton26@goi.kolasc.net.ru,

¹ Горный институт Кольского научного центра РАН.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 4, pp. 184–195.

UDC
622.271.3

**V.V. Rybin, V.I. Panin, K.N. Konstantinov, Startsev Yu.A.,
A.S. Kalyuzhnyy**

MONITORING OF MIGRATION OF WATER-SATURATED AREAS FOR THE STABILITY PREDICTION OF PITWALLS

The paper presents the results of the control for the geomechanical state at a near-con-
tour zone of a large ore open-pit located at the north-western Russia. The control was per-
formed with a seismic tomography method. The velocity models received in different climate
seasons were analyzed. There were revealed dependencies of the models' character varia-
tions on a degree of the rock mass watering and fissuring; this has significant influence of the

slope stability. The recommendations are given on maintaining the slope stability in a zone of a responsible facility.

Key words: geomechanics, geophysics, seismic tomography, velocity model, open-pit, pit wall.

AUTHORS

Rybin V.V.¹, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
Leading Researcher, e-mail: rybin@goi.kolasc.net.ru,
Panin V.I.¹, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher,
Konstantinov K.N.¹, Junior Researcher,
e-mail: const@goi.kolasc.net.ru,
Startsev Yu.A.¹, Leading Technologist,
Kalyuzhnyy A.S.¹, Junior Researcher,
e-mail: anton26@goi.kolasc.net.ru,

¹ Mining Institute of Kola Scientific Centre
of Russian Academy of Sciences, 184209, Apatity, Russia.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study has been supported by the Russian Science Foundation in the framework of the Basic Research and Exploration by Individual Research Groups, Project No. 17-1701302.

REFERENCES

1. Mel'nikov N.N., Kozyrev A.A. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015. Special edition 56, no 11, pp. 7–23.
2. Stacey T.R., Xianbin Y., Armstrong R., Keyter G.J. New slope stability considerations for deep open pit mines. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 2003, pp. 373–390.
3. Mel'nikov N.N., Kozyrev A.A., Reshetnyak S.P., Kaspar'yan E.V., Rybin V.V., Melik-Gaykazov I.V., Svinin V.S., Ryzhkov A.N. *Trudy 8-go mezhdunarodnogo simpoziuma «Gornoe delo v Arktike»* (Mining in the Arctic: The 8th International Symposium Proceedings), Saint-Petersburg, Tipografiya Ivan Fedorov, 2005, pp. 2–14.
4. Kozyrev A.A., Rybin V.V., Konstantinov K.N. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2012, no 10, pp. 113–119.
5. Yakovlev A.V., Ermakov N.I. *Ustoychivost' bortov rudnykh kar'erov prideystvii tektonicheskikh napryazheniy v massive* (Stability of ore pitwalls under influence of tectonic stresses), Ekaterinburg, IGD UrO RAN, 2006, 231 p.
6. Kozyrev A.A., Rybin V.V., Zhirov D.V., Bilin A.L., Vinogradov A.N., Kaspar'yan E.V., Vinogradov Yu.A., Semenova I.E., Zhirova A.M. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015. Special edition 56, no 11, pp. 193–200.
7. Kozyrev A.A., Rybin V.V., Zhirov D.V., Bilin A.L., Vinogradov A.N., Kaspar'yan E.V., Vinogradov Yu.A., Semenova I.E., Zhirova A.M. *Vestnik MGTU*. 2009. vol. 12, no 4, pp. 644–653.
8. *Seysmicheskaya tomografiya. S prilozheniyami v global'noy seysmologii i razvedochnoy geofizike* (Seismic tomography. With applications in the global seismology and exploration geophysics), Moscow, Mir, 1990, 415 p.
9. Panin V.I., Startsev Yu.A. *Geodinamika i napryazhennoe sostoyanie nedr Zemli* (Geodynamics and stress state of the Earth's interior), Novosibirsk, IGD, 2008, pp. 142–146.
10. Kaspar'yan E.V., Rybin V.V., Startsev Yu.A. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN*. 2011, no 3, pp. 31–34.