

# Комплексный анализ результатов мониторинга устойчивости уступов карьера с использованием геофизических методов исследования

В.В. Рыбин, А.И. Калашник, К.Н. Константинов✉, А.Ю. Дьяков, Ю.А. Старцев, Д.В. Запорожец  
Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация  
✉ k.konstantinov@ksc.ru

**Резюме:** Решение круга вопросов, связанных с обеспечением безопасности при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом, основывается на постоянном контроле устойчивости борта карьера в целом, проблемных участков борта и отдельных уступов. При этом важное значение в общей системе мониторинга устойчивости элементов открытой системы разработки имеет контроль геомеханического состояния приконтурного массива с использованием локальных геофизических методов, который позволяет более подробно исследовать состояние уступов и групп уступов в ответственных зонах карьера и на этой основе разрабатывать мероприятия по обеспечению безопасности производства.

Одними из основных взаимообусловленных факторов, влияющих на устойчивость карьерных уступов, являются, с одной стороны, размеры нарушенной зоны, зависящей как от природной, так и от техногенной трещиноватости массива пород, с другой стороны, уровень грунтовых вод, изменяющийся во времени в зависимости от сезона.

В связи с важностью совместного учёта перечисленных факторов предложен комплексный методический подход исследования водонасыщенности и структурной нарушенности массива пород в борту глубокого карьера, заключающийся в выполнении периодических, сезонно синхронизированных геофизических исследований методами сейсмического профилирования и георадарного зондирования и позволяющий определять зоны повышенного водонасыщения и нарушенности прибортового массива. Методический подход позволяет оценивать влияние основных изменяющихся во времени влияющих факторов (водонасыщение, природная и техногенная нарушенность, аномалии физических свойств массива пород) на устойчивость карьерных уступов и предоставляет научно-техническую основу для разработки инженерных мероприятий по повышению безопасности открытых горных работ на больших глубинах.

**Ключевые слова:** геомеханика, геофлюидомеханика, рудный карьер, коэффициент Пуассона, модуль упругости, водонасыщенность, структурная геология, сейсмический метод, георадиолокация, комплексирование

**Для цитирования:** Рыбин В.В., Калашник А.И., Константинов К.Н., Дьяков А.Ю., Старцев Ю.А., Запорожец Д.В. Комплексный анализ результатов мониторинга устойчивости уступов карьера с использованием геофизических методов исследования. *Горная промышленность*. 2023;(5S):87–92. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-87-92>

## A comprehensive analysis of results obtained in monitoring pit bench stability using geophysical survey methods

V.V. Rybin, A.I. Kalashnik, K.N. Konstantinov✉, A.Yu. Dyakov, Yu.A. Startsev, D.V. Zaporozhets  
Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Science; Apatity, Russian Federation  
✉ k.konstantinov@ksc.ru

**Abstract:** The Response to challenges related to safety in open-pit mining of mineral deposits is based on continuous monitoring of the pit wall stability as a whole as well as the stability of problematic areas of the pit wall and individual benches. Control of the geomechanical state of the adjacent rock mass using local geophysical methods plays an important role in the overall monitoring of stability of the open-pit elements. The control allows studying in more detail the state of benches and groups of benches in critical areas of the open-pit and developing measures to ensure production safety on this basis.

One of the main interdependent factors affecting the pit wall stability is, on the one hand, the size of the disturbed zone that depends on both natural and mining-induced rock fracturing; on the other hand, the level of ground water changing over time depending on the season.

The importance of joint account of the factors above has stipulated to propose a comprehensive methodical approach to study water saturation and structural disturbance of rocks in the wall of a deep open-pit. The method consists in periodic, seasonally synchronized, geophysical studies using seismic profiling and GPR sounding and allows identifying the areas of high water saturation and disturbance in the adjacent rock mass. The methodological approach makes it possible to estimate the effect of the main time-varying impact factors (water saturation, natural and mining-induced disturbance, anomalies of physical properties of the rock mass) on the slope stability and provides a scientific and technical basis for developing engineering measures to improve the safety of deep open-pit mining.

**Keywords:** geomechanics, geo-fluid mechanics, open-pit ore mine, Poisson's ratio, modulus of elasticity, water saturation, structural geology, seismic method, georadiolocation, complexing

**For citation:** Rybin V.V., Kalashnik A.I., Konstantinov K.N., Dyakov A.Yu., Startsev Yu.A., Zaporozhets D.V. A comprehensive analysis of results obtained in monitoring pit bench stability using geophysical survey methods. *Russian Mining Industry*. 2023;(5S):87–92. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-87-92>

**Введение**

Необходимым условием эффективной эксплуатации сверхглубокого рудного карьера является учет совокупности влияющих на устойчивость борта факторов на протяжении всего срока его эксплуатации. К основным факторам, оказывающим влияние на устойчивость элементов открытой геотехнологии, относятся: технологические (эффективные параметры борта карьера и его конструктивных элементов, качество буровзрывных работ) и горно-геологические (структурная геология, гидрогеология, физико-механические свойства пород). При этом в современной практике геомеханического обеспечения ведения горных работ применяются геофизические методы исследования состояния массива. Обработка полученных результатов осуществляется с применением цифровых технологий.

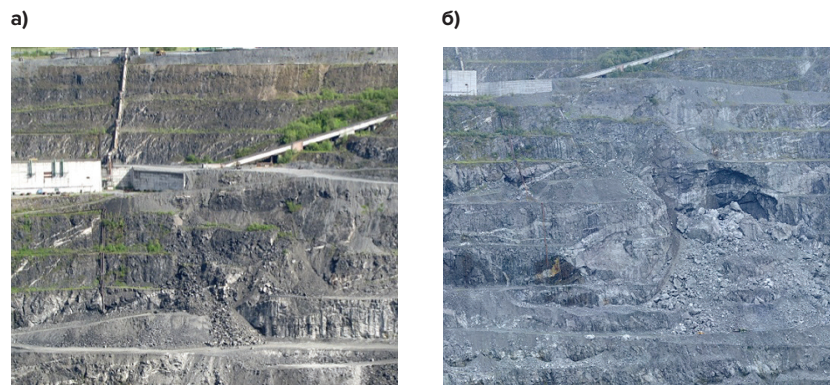
В настоящее время контур карьера рудника «Железный» (далее – карьер), обрабатывающего Ковдорское месторождение апатит-бадделейтовых руд с 1960-х годов, претерпевает изменение в связи с интенсификацией производственных процессов как в плане, так и на глубину. В результате за последние 10 лет карьерное пространство увеличилось в плане с севера на юг примерно на 50%, достигнув примерно 3,5 км, с запада на восток – на 25%, составляя к настоящему времени порядка 2,5 км. Абсолютная глубина карьера увеличилась ориентировочно на 15%, составляя примерно 600 м.

По данным инженерно-геологического районирования<sup>1</sup> массив горных пород в окрестности карьера весьма неоднороден как на глубину, так и по простиранию (в плане). Верхние горизонты по всему периметру контура карьера сложены слабосвязанными, дезинтегрированными разностями пород. По мере углубления карьера прибортовый массив представлен в основном прочными скальными породами. В таких условиях определяющее значение при решении вопросов обеспечения устойчивости будут иметь структурные неоднородности различного порядка, характерные для иерархично-блочной структуры массива пород.

Наибольшее внимание достаточно длительное время концентрирует на себе именно восточный участок борта карьера, характеризующийся наличием крутопадающих разломов и систем трещин различного иерархичного уровня, которые по параметрам залегания относительно контура карьера влияют на устойчивость прибортового массива. В свою очередь, водонасыщенность пород, как правило, оказывает негативное влияние на прочностные свойства пород, ухудшает показатели сцепления и угла внутреннего

трения, способствуя раскрытию трещин и провоцируя потенциально возможные случаи потери устойчивости уступов и групп уступов участка борта карьера.

Ранее актуальность изучения данного участка с точки зрения устойчивости была обусловлена расположением здесь здания рудо-дробильного конвейерного комплекса (РДКК) и обозначилась в июне 2010 г., когда произошла потеря устойчивости группы уступов (рис. 1, а), и получила развитие после августа 2015 г., после второго обрушения (рис. 1, б) [1]. По результатам изучения геомеханического состояния массива пород комплексом инструментальных натуральных методов Горным институтом КНЦ РАН были сделаны рекомендации по необходимости организации системы мониторинга восточного участка борта карьера [2; 3].



**Рис. 1**  
Обрушение уступов в районе РДКК в июне 2010 г. (а) и в августе 2015 г. (б)

**Fig. 1**  
Bench collapse in the area of the ore-crushing conveyor complex in June 2010 (a) and in August 2015 (b)

По результатам периодических многолетних исследований сейсмическим методом ниже отм. +142 м в совокупности с данными о геолого-структурных особенностях данного участка борта и развитии деформационных процессов были сделаны выводы об «относительно менее устойчивом состоянии» данной группы уступов [4].

С целью обеспечения безопасности ведения горных работ в процессе изменения положения контура на восточном участке борта карьера выполнены два цикла исследований геомеханического состояния и водонасыщенности массива пород на отм. +140 м (ниже демонтированного РДКК) сейсмическим методом и методом георadiолокации. Для учета сезонного фактора измерения выполнялись в марте и июне. Важно отметить, что комплексные исследования выполнялись по единому профилю (кривая красного цвета) с маркшейдерской привязкой его основ-

<sup>1</sup> Выполнено при участии Геологического института КНЦ РАН (Д.В. Жиров)



**Рис. 2**  
Расположение профиля комплексных геофизических исследований на восточном участке борта

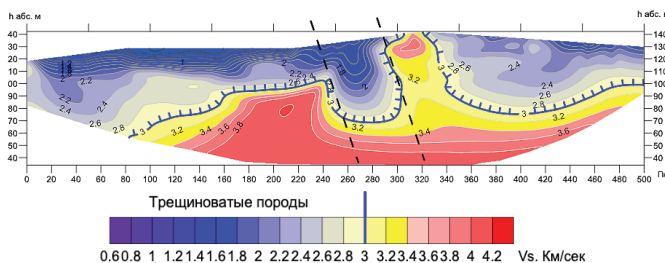
**Fig. 2**  
Location of the complex geophysical survey profile in the eastern section of the bench

ных точек (точек перегиба) для учета изменчивости рельефа участка контроля (рис. 2). Общая длина исследуемого участка составила 500 м.

**Результаты**

*Исследования сейсмическим методом.* Для оценки упругих характеристик массива применяется методика сейсмического профилирования на продольных преломлённых волнах, при которой возбуждения и приём упругих колебаний осуществляются вдоль общего профиля в вертикальной плоскости. При такой длине профиля глубина исследования от подошвы уступа, на которой полученные данные можно считать достоверными, достигает 110 м.

Модель на поперечных  $V_S$  волнах, в сравнении с распределением  $V_P$  волн, более качественно отражает структуру массива (рис. 3). Результаты измерений летнего периода показали практически не изменившуюся конфигурацию изолиний и значений скоростей  $V_S$  волн, за исключением верхней части разреза, где на глубину до 20 м имеется динамика к уменьшению скоростей  $V_S$  волн по сравнению с уровнем  $V_S$  волн в марте, когда приповерхностная часть бермы в мерзлом состоянии и распространение упругих волн в такой среде улучшается. На рис. 3 между пикетами 240–280 м от горизонта +142 до гор +40 м чётко выделяется наклонная область с низкими скоростями  $V_S$  волн, свидетельствующая о развитии техногенной трещиноватости в границах предполагаемого геоструктурного блока.



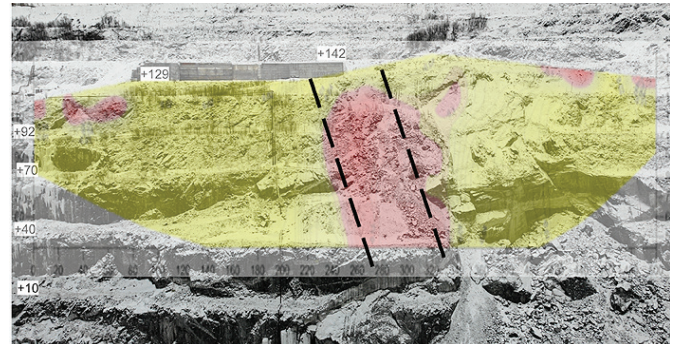
**Рис. 3**  
Скоростная модель  $V_S$  волн исследуемого участка, 14.06.2022 г.

**Fig. 3**  
A  $V_S$  wave velocity model of the surveyed area, July 14, 2022

На рис. 4 и 5 показаны разностные модели рассчитанных коэффициента Пуассона  $\nu$ , модуля упругости (Юнга)  $E$  по результатам циклических измерений двух циклов.

Возможность определения  $\nu$  и  $E$  заложена в зависимости скоростей упругих волн и (от) геомеханического состояния массива. Для наглядности представлены проекции  $\nu$  и  $E$  на фотоизображении зоны контроля. При этом важно понимать, что сопоставляются разностные модели в вертикальной плоскости по профилю, расположенному на значительном расстоянии от бровки уступа (см. рис. 2), с поверхностью группы уступов, массив пород которых в техногенной зоне претерпевает существенные изменения геомеханического состояния вследствие воздействия ведущих горных работ, сезонного фактора и процессов выветривания.

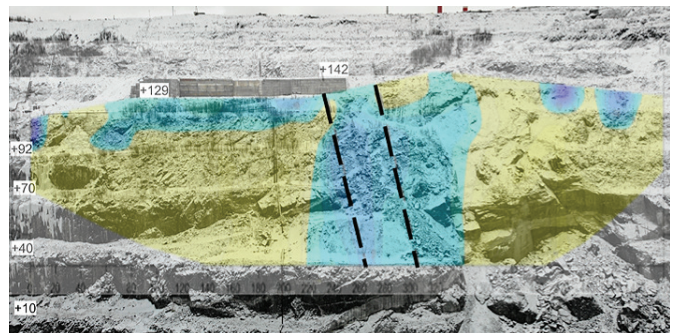
Коэффициент Пуассона качественно отражает трещиноватость массива. Проекция разностной модели  $\nu$  визуально указывает на возможную корреляцию контактов разрывных нарушений субвертикального падения, ограничивающих геоструктурный блок, обозначенный на рис. 4 черными штриховыми линиями, с заниженными упругими характеристиками вследствие действующих неблагоприятных факторов, в числе которых и обводненность массива пород.



**Рис. 4**  
Проекция распределения разностной модели  $\nu$  на фотоизображении участка контроля

**Fig. 4**  
Projection of the difference model  $\nu$  distribution on the photo image of the control area

При уменьшении упругих характеристик будет снижаться устойчивость массива пород, что наглядно иллюстрируется динамикой изменения модуля упругости между двумя циклами, разностная модель которой представлена в проекции на фотоизображении участка контроля (рис. 5).



**Рис. 5**  
Проекция распределения разностной модели  $E$  на фотоизображении участка контроля

**Fig. 5**  
Projection of the difference model  $E$  distribution on the photo image of the control area

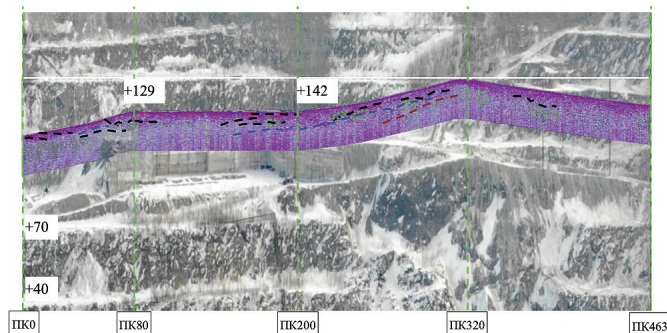
Абсолютные значения модуля упругости в зоне, ограниченной штриховыми линиями, снизились до 10 ГПа. Также изменения произошли в верхней части профиля со снижением величины  $E$  до 20 ГПа, что свидетельствует об уменьшении упругих характеристик массива пород.

Таким образом, анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что горные породы в верхней части разреза на глубину до 20 м относительно более нарушенные по сравнению с породами нижней части разреза. Что касается пород в районе развития техногенной трещиноватости в границах геоструктурного блока, то здесь также отмечаются изменения, свидетельствующие о снижении устойчивости прибортового массива. Учитывая отсутствие динамических воздействий на контролируемый участок массива пород в период времени между измерениями первого (март) и второго (июнь) циклов, можно предположить, что изменения упругих свойств пород связаны с изменением обводнённости массива и промерзанием верхней части разреза в период первого цикла исследований.

Исследования методом георадиолокации. Наряду с сейсмическим одним из оперативных методов изучения геолого-структурного строения массива скальных пород является георадиолокационный, который позволяет исследовать изменение физических свойств в массиве пород посредством излучения электромагнитного поля [5–8]. Изменчивость свойств и неоднородность массива скальных пород обуславливает изменение параметров результирующего электромагнитного сигнала георадарного зондирования [9–13]. По результатам периодических многолетних исследований горнотехнических объектов метод георадиолокации показал хорошую информативность в задачах исследования их структуры и состояния [14].

Исследования методом георадиолокации выполнены также в два цикла, синхронно с сейсмическим методом, по общей линии профилирования, с применением двух георадарных комплексов: Ramac/GPR X3M (экранированные антенны с глубиной зондирования до 35 м) и «ЛОЗА-1В» (неэкранированные антенны с глубиной зондирования до 25 м). Обследование участка уступа георадарным комплексом RAMAC GPR/X3M было выполнено с использованием экранированной антенны 100 МГц с шагом измерения 0,1 м. На рис. 6 представлена проекция радарограммы RAMAC GPR/X3M на фотопанораму исследуемого участка по 2-му циклу георадарных измерений.

Анализ радарограммы показывает, что в начале профиля, как и при измерениях первого цикла, выделяются две



**Рис. 6**  
Проекция радарограммы RAMAC GPR/X3M на фотопанораму исследуемого участка

**Fig. 6**  
Projection of a RAMAC GPR/X3M radarogram on the photographic panoramic view of the surveyed area

приповерхностные субгоризонтальные неоднородности, отмеченные штриховыми линиями черного цвета. На отметках 80–100 м длины профиля на глубине около 8 м от поверхности прослеживаются неоднородности, которые на радарограммах первого цикла имели клиновидную форму. На отметках профиля 52–95 м и глубине около 10–11 м была выявлена новая неоднородность, параллельная дневной поверхности. Также в интервале профиля от 50 до 78 м и глубине около 5 м по характерным волновым характеристикам сигнала идентифицируется уровень подземных вод, отмеченный штриховой линией голубого цвета, который ранее не был выявлен.

На участках 110–127, 170–197 и 185–218 м профиля в приповерхностном слое на глубине от 4 до 7 м, выделяются три субгоризонтальные неоднородности, субпараллельные поверхности уступа карьера. По сравнению с результатами измерений 1-го цикла, выделяется одна водонасыщенная зона пород, располагающаяся на границе структурной неоднородности на отметках профиля 204–213 м и глубине около 5 м (овал зеленой штриховкой). Поверхность предполагаемого уровня подземных вод идентифицируется на том же участке профиля и является более пологой.

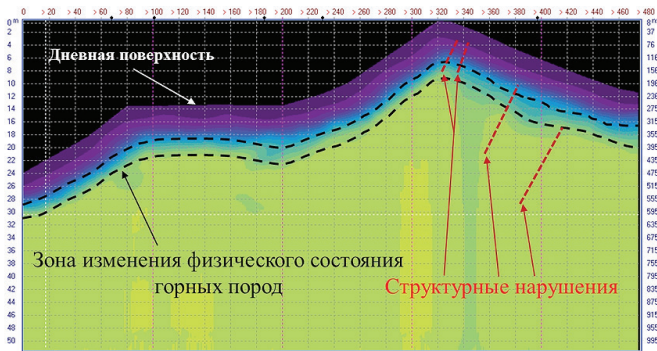
Ввиду сильного обводнения поверхности уступа, а также вследствие воздушных переотражений сигналов из пробуренных скважин оказалось невозможным выделить отмеченные в первом цикле приповерхностные структурные неоднородности на глубине 0,5–3,0 м. Остальные структуры интерпретируются на тех же участках, которые были отмечены при первом цикле исследований. На радарограмме локализуются контрастные участки, предположительно, с повышенным водонасыщением пород (243–254, 255–267, 285–293 м профиля). Поверхность предполагаемого уровня подземных вод стала менее контрастной, имеет более пологую форму, чем ранее, и идентифицируется на участке 225–307 м профиля. Граница литологической разности пород, выделенная ранее и отмеченная штриховой кривой коричневого цвета, сохранила своё положение.

На участке профиля ПК340–ПК463 идентифицируются предположительно водонасыщенные зоны: 348–356 м профиля (глубина 6 м), 388–394 м профиля (глубина 8 м), 397–408 м профиля (глубина 9 м). Четко выраженного уровня подземных вод, выделенного по данным измерений 1-го цикла в правой части профиля, в результатах измерений 2-го цикла не прослеживается.

Обследование участка георадарным комплексом «ЛОЗА-1В» было выполнено с использованием неэкранированной антенны 100 МГц с шагом измерения 1 м. На рис. 7 представлена обработанная и интерпретированная радарограмма.

Анализ радарограмм двух циклов измерений показал идентичную картину распределения волновых характеристик сигнала, отражающих внутреннюю структуру подповерхностного массива пород.

В правой части профиля на отметках длины 340, 390 и 440 м прослеживаются скрытые структурные нарушения. Значения скоростей по теоретически рассчитанной гиперболе лежат в интервале 6,38–8,54 см/нс, что свидетельствует, что данные отражения получены от структур, находящихся в массиве скальных пород. Стоит отметить, что выявленное в первом цикле нарушение визуально определяется и на поверхности уступа, и по данным измерений второго цикла идентифицируется уже двумя параллельными крупными трещинами (на интервалах 330 и 340 м). Это стало возможным вследствие поступления по-



**Рис. 7**  
Интерпретированная после фильтрации радарограмма ЛОЗА-1В

**Fig. 7**  
A LOSA-1V radarogram interpreted upon filtering

верхностной воды непосредственно в нарушения и позволило более контрастно идентифицировать контуры структурных нарушений на радарограмме.

Применение процедур низкочастотной фильтрации (низкочастотный прямоугольный фильтр с «косинус-квадратной» характеристикой и низкочастотный реверсивный фильтр с прямоугольной импульсной характеристикой) для полученных данных позволило избавиться от большого количества «паразитных» отражений и представить полученные данные в форме изменения амплитуды сигнала по глубине. Анализ волновой радарограммы (см. рис. 7) позволил выявить изменения амплитудной формы сигнала на глубине 7,5–11,5 м от поверхности, где происходит значительное затухание сигнала, которое может свидетельствовать о переходе пород из сухого в водонасыщенное состояние. Стоит отметить, что выявленная зона возможного водонасыщения, по сравнению с данными первого цикла, незначительно сместилась к дневной поверхности (на интервале профиля 80–250 м изменения составили 1–1,5 м).

### Список литературы

1. Розанов И.Ю., Ковалев Д.А. Результаты анализа данных радарной системы мониторинга устойчивости борта карьера «Железный» АО «Ковдорский ГОК». *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(12-1):122–133. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_121\\_0\\_122](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_121_0_122)
2. Рыбин В.В., Константинов К.Н., Каган М.М., Панасенко И.Г. Принципы организации комплексной системы мониторинга устойчивости объектов горнодобывающего предприятия. *Горный журнал*. 2020;(1):53–57. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.10>
3. Каспарьян Э.В., Кожуховский А.В., Розанов И.Ю. Опыт организации мониторинга устойчивости бортов и уступов карьера. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2015;(5):67–74.
4. Rybin V., Konstantinov K., Starcev Y. The elastic characteristics of the rock massif in the open pit wall: Analysis of the dynamics of changes. In: *21<sup>st</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2021, 16–22 August, 2021*. 2021;12(7.1):487–494. <https://doi.org/10.5593/sgem2021/1.1/s03.060>
5. Жуков А.А., Пригара А.М., Царев Р.И., Ворошилов В.А. Решение горнотехнических задач на месторождении калийных солей методами геофизики. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(5-1):82–91. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_51\\_0\\_82](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_51_0_82)
6. Мусалев Д.Н., Прохоров Н.Н., Клабук А.М. Опыт георадиолокационных исследований при научно-техническом сопровождении горных работ на Старобинском месторождении калийных солей. *Горный журнал*. 2018;(8):42–47. <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.08.05>
7. Соловьев Е.Э., Саввин Д.В., Федорова Л.Л. Исследование геокриологических условий массива мерзлых горных пород неразрушающими электромагнитными методами. *Горный журнал*. 2019;(2):31–37. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.02.06>
8. Bricheva S.S., Deev E.V., Dubrovin I.O., Doroshenkov M.M., Entin A.L., Panin A.V. Ground-penetrating radar evidence of faulting in unconsolidated coarse sediments. In: *NSG2021 27<sup>th</sup> European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, August 2021, pp. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202120241>
9. Ercoli M., Cirillo D., Pauselli C., Jol H.M., Brozzetti F. Ground-penetrating radar signature of Quaternary faulting: a study from the Mt. Pollino region, southern Apennines, Italy. *Solid Earth*. 2021;12(11):2573–2596. <https://doi.org/10.5194/se-12-2573-2021>
10. Bano M., Tsend-Ayush N., Schlupp A., Munkhuu U. Ground-penetrating radar imaging of near-surface deformation along the Songino active fault in the vicinity of Ulaanbaatar, Mongolia. *Applied Sciences*. 2021;11(17):8242. <https://doi.org/10.3390/app11178242>
11. Chamyal L.S., Joshi P., Vasaiakar S., Maurya D.M. Neotectonic characterization of the Narmada-Son Fault (NSF) using field and GPR data, Gujarat, western India. *Journal of the Palaeontological Society of India*. 2022;67(1):72–84.

### Заключение

По результатам комплексных геофизических исследований можно сделать следующие выводы:

1. Исследования сейсмическим методом в варианте профилирования показали принципиально не изменившиеся упругие характеристики контролируемого участка. При этом породы в верхней части разреза на глубину до 20 м относительно более нарушенные. В районе контактов разрывных нарушений субвертикального падения, ограничивающих геоструктурный блок, и в целом на контролируемом участке показательны изменения величин коэффициента Пуассона и модуля упругости, свидетельствующие об ухудшении геомеханического состояния массива пород.
2. По данным георадарного обследования уточнены особенности внутренней структуры массива пород участка уступа карьера, а также локализованы зоны повышенного водонасыщения. Сравнительный анализ результатов двух циклов исследований показал практически полную их корреляцию. По результатам георадарных измерений установлено, что уровень возможного водонасыщения пород находится на глубине 7,5–11,5 м от дневной поверхности. Выявлены скрытые структурные нарушения массива пород в интервале отметок профиля 340–440 м.
3. Комплексирование волновых методов георадиолокации и сейсмопрофилирования для выявления опасных фильтрационно-деформационных процессов позволило идентифицировать и локализовать зоны повышенного водонасыщения и структурных нарушений в массиве скальных пород, что дало возможность получить дополнительное обоснование для достоверной интерпретации данных геофизических исследований при решении такого рода задач.

12. Kobayashi T., Sun C., Choi J.-H. Near-surface fault investigation by Ground Penetrating Radar (GPR) surveys. *Journal of the Geological Society of Korea*. 2022;58(4):445–455. (In Korean) <https://doi.org/10.14770/jgsk.2022.58.4.445>
13. Bali B.S., Wani A.A. Analysis of neotectonic structures in the piedmont region of PirPanjal Range NW Himalaya by integrating geomorphic indicators coupled with geophysical transects (GPR). *Natural Hazards*. 2021;105(2):2869–2882. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04428-4>
14. 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):39–49. Режим доступа: <https://www.aaresearch.science/jour/article/view/49>

**References**

1. Rozanov I.Yu., Kovalev D.A. Analysis of radar monitoring data on the slope stability of Zhelezny open pit, Kovdorsky GOK JSC. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(12-1):122–133. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_121\\_0\\_122](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_121_0_122)
2. Rybin V.V., Konstantinov K.N., Kagan M.M., Panasenko I.G. Methodology of integrated stability monitoring in mines. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(1):53–57. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.10>
3. Kasparian E.V., Kozhukhovskii A.V., Rozanov I.Iu. The organisation experience of open pit walls and benches stability monitoring. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal*. 2015;(5):67–74. (In Russ.)
4. Rybin V., Konstantinov K., Starcev Y. The elastic characteristics of the rock massif in the open pit wall: Analysis of the dynamics of changes. In: *21<sup>st</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2021, 16–22 August, 2021*. 2021;12(7.1):487–494. <https://doi.org/10.5593/sgem2021/1.1/s03.060>
5. Zhukov A.A., Prigara A.M., Tsarev R.I., Voroshilov V.A. Solution of mining engineering problems at a potassium salt deposit using geophysical methods. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(5-1):82–91. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_51\\_0\\_82](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_51_0_82)
6. Musalev D.N., Prokhorov N.N., Klabuk A.M. Experience of GPR application in scientific and engineering supervision of potash mining at the Starobinsk deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2018;(8):42–47. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.08.05>
7. Soloviev E.E., Savvin D.V., Fedorova L.L. Geocryological exploration of frozen rock mass by nondestructive electromagnetic methods. *Gornyi Zhurnal*. 2019;(2):31–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.02.06>
8. Bricheva S.S., Deev E.V., Dubrovin I.O., Doroshenkov M.M., Entin A.L., Panin A.V. Ground-penetrating radar evidence of faulting in unconsolidated coarse sediments. In: *NSG2021 27<sup>th</sup> European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, August 2021, pp. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202120241>
9. Ercoli M., Cirillo D., Pauselli C., Jol H.M., Brozzetti F. Ground-penetrating radar signature of Quaternary faulting: a study from the Mt. Pollino region, southern Apennines, Italy. *Solid Earth*. 2021;12(11):2573–2596. <https://doi.org/10.5194/se-12-2573-2021>
10. Bano M., Tsend-Ayush N., Schlupp A., Munkhuu U. Ground-penetrating radar imaging of near-surface deformation along the Songino active fault in the vicinity of Ulaanbaatar, Mongolia. *Applied Sciences*. 2021;11(17):8242. <https://doi.org/10.3390/app11178242>
11. Chamyal L.S., Joshi P., Vasaiakar S., Maurya D.M. Neotectonic characterization of the Narmada-Son Fault (NSF) using field and GPR data, Gujarat, western India. *Journal of the Palaeontological Society of India*. 2022;67(1):72–84.
12. Kobayashi T., Sun C., Choi J.-H. Near-surface fault investigation by Ground Penetrating Radar (GPR) surveys. *Journal of the Geological Society of Korea*. 2022;58(4):445–455. (In Korean) <https://doi.org/10.14770/jgsk.2022.58.4.445>
13. Bali B.S., Wani A.A. Analysis of neotectonic structures in the piedmont region of PirPanjal Range NW Himalaya by integrating geomorphic indicators coupled with geophysical transects (GPR). *Natural Hazards*. 2021;105(2):2869–2882. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04428-4>
14. Melnikov N.N., Kalashnik A.I., Zaporozhets D.V., Dyakov A.Yu., Maksimov D.A. Experience in applying georadar subsurface studies at the Russian Arctic western sector. *Arctic and Antarctic Research*. 2016;(1):39–49. (In Russ.) Available at: <https://www.aaresearch.science/jour/article/view/49>

**Информация об авторах**

**Рыбин Вадим Вячеславович** – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация

**Калашник Анатолий Ильич** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация

**Константинов Константин Николаевич** – научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: k.konstantinov@ksc.ru

**Дьяков Андрей Юрьевич** – научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация

**Старцев Юрий Алексеевич** – научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация

**Запорожец Дмитрий Владимирович** – научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация

**Информация о статье**

Поступила в редакцию: 05.10.2023

Поступила после рецензирования: 07.11.2023

Принята к публикации: 20.11.2023

**Information about the authors**

**Vadim V. Rybin** – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Chief of Laboratory of Geomonitoring and Slope Stability, Rock Mechanics Department, Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation  
**Anatolii I. Kalashnik** – Cand. Sci. (Eng.), Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation

**Konstantin N. Konstantinov** – Researcher, Mining Institute, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: k.konstantinov@ksc.ru

**Andrey Y. Dyakov** – Researcher, Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation

**Yury A. Startsev** – Researcher, Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation

**Dmitry V. Zaporozhets** – Researcher, Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation

**Article info**

Received: 05.10.2023

Revised: 07.11.2023

Accepted: 20.11.2023