



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

Б. К. Норель, Ю. В. Петров, Н. С. Селютина

# Энергетические и временные характеристики

*предельного состояния  
горных пород*



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Б. К. Норель, Ю. В. Петров, Н. С. Селютина

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ  
И ВРЕМЕННЫЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ  
ГОРНЫХ ПОРОД



ИЗДАТЕЛЬСТВО САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

УДК 539.424  
ББК 22.251  
Н82

Рецензенты: д-р физ.-мат. наук, проф. С. А. Атрошенко (ИПМаш РАН);  
д-р физ.-мат наук А. А. Груздков (С.-Петерб. гос. технолог. ин-т (техн. ун-т))

Авторы: Б. К. Норель (гл. 1–3), Ю. В. Петров (гл. 4–6), Н. С. Селютина (гл. 4–6)

*Рекомендовано к публикации Научной комиссией  
в области математики и механики  
Санкт-Петербургского государственного университета*

### **Норель Б. К., Петров Ю. В., Селютина Н. С.**

Н82 Энергетические и временные характеристики предельного состояния горных пород. — СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2018. — 132 с.  
ISBN 978-5-288-05867-7

В монографии рассмотрены критерии прочности горных пород, испытывающих действие статического и динамического нагружения, в том числе с учетом различных видов объемных напряженных состояний. Предложен метод использования установок трехосного сжатия при выполнении необходимого комплекса механических испытаний образцов пород для определения параметров критериев квазистатического разрушения. Также представлен активно разрабатываемый в последние годы структурно-временной подход, применяемый для прогноза динамической прочности горных пород в широком диапазоне скоростей деформации, основанный на понятии инкубационного времени. Расчет временных зависимостей динамической прочности с соответствующей оценкой инкубационного времени разрушения горных пород позволяет объяснить природу многих принципиальных эффектов динамического разрушения пород. Хорошее соответствие результатов расчета с экспериментальными данными и удобная расчетная схема показывают высокую эффективность предложенного подхода

Издание предназначено научным и инженерно-техническим работникам горнодобывающей промышленности, а также широкому кругу специалистов, решающих задачи в области вопросов прочности, разрушения и надежности горных пород и неметаллических твердых тел; может быть рекомендовано в качестве учебного пособия преподавателям и студентам соответствующего направления.

УДК 539.424  
ББК 22.251



Издание осуществлено при финансовой поддержке  
Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 18-11-00007,  
не подлежит продаже.

Научное издание

*НОРЕЛЬ Бронислав Константинович, ПЕТРОВ Юрий Викторович, СЕЛЮТИНА Нина Сергеевна*  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Редактор А. Б. Иванова Корректор Е. В. Величина Компьютерная верстка Ю. Ю. Тауриной Обложка Е. Р.  
Куныгин Подписано в печать 30.10.2018. Формат 70×100 1/16. Усл. печ. л. 10,9. Тираж 300 экз. Заказ № 654.

Издательство Санкт-Петербургского университета. 199004, С.-Петербург, В.О., 6-я линия, 11.

Типография Издательства СПбГУ. 199034, С.-Петербург, Менделеевская линия, д. 5.

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2018  
ISBN 978-5-288-05867-7 © Б. К. Норель, Ю. В. Петров, Н. С. Селютина, 2018

# Оглавление

Предисловие .....	5
<b>Глава 1. Обзор аналитических подходов механики горных пород при статическом нагружении .....</b>	<b>7</b>
1.1. Экспериментальные наблюдения разрушения горных пород вблизи выработок .....	7
1.2. Экспериментально-аналитические методы анализа механического состояния массива в ходе горных работ .....	15
1.3. Развитие теории механических моделей на основе данных лабораторных экспериментов по трехосному нагружению .....	17
<b>Глава 2. Анализ изменения деформаций и прочностных характеристик горных пород при действии объемных нагрузок .....</b>	<b>23</b>
2.1. Механические испытания горных пород.....	23
2.2. Условия проведения испытаний.....	25
2.3. Особенности нагружения деформируемых неоднородных твердых тел и горных пород при различных объемных напряженных состояниях и вблизи горных выработок .....	29
2.4. Инварианты объемного напряженного состояния равновесной среды как основные характеристики механического состояния деформируемого твердого тела .....	31
2.5. Инварианты и девиаторы объемного напряженного состояния как механические характеристики соотношений связи между напряжениями и деформациями твердого тела .....	36
2.6. Механические свойства дополнительного физического параметра $\mu_0$ , характеризующего объемное напряженное состояние горных пород в массиве.....	37
2.7. Результаты механических испытаний образцов горных пород...	39

## 4 Оглавление

2.8. Определение двух предельных состояний: обобщенный сдвиг и обобщенное растяжение.....	59
2.9. Паспорт распределения параметров механического состояния горных пород для различных видов объемного напряженного состояния.....	64
<b>Глава 3. Механическая модель анизотропных горных пород .....</b>	<b>67</b>
3.1. Задача исследования.....	67
3.2. Физические показатели механического состояния горных пород вблизи выработок .....	69
3.3. Изменение объемных характеристик горных пород при действии объемных нагрузок (согласно теории разрушения твердых тел Надаи).....	71
3.4. Формирование зон различных видов объемных нагрузок горных пород вблизи выработок.....	74
<b>Глава 4. Общая формулировка структурно-временного подхода к расчету прочности горных пород и бетона при их хрупком разрушении из-за высокоскоростного воздействия.....</b>	<b>81</b>
4.1. Расчетная схема прочности в широком диапазоне скоростей деформаций.....	85
4.2. Примеры.....	87
<b>Глава 5. Динамические эффекты прочности при хрупком разрушении под влиянием гетерогенности структуры.....</b>	<b>91</b>
5.1. Эффект инверсии прочности как следствие скоростной чувствительности материала.....	91
5.2. Доминирующее значение водонасыщенности и влияние воды в целом на динамическую прочность бетона при раскалывании.....	98
5.3. Прочность армированного бетона под действием динамических нагрузок.....	105
<b>Глава 6. Определение прочности на различных масштабных уровнях. Различие размерного и масштабного эффектов .....</b>	<b>110</b>
6.1. Определение масштабного уровня разрушения.....	110
6.2. Различия размерного и масштабного эффектов прочности.....	115
6.3. Изменение прочности бетона в зависимости от поперечного сечения образца .....	117
6.4. Изменение прочности образца горной породы в зависимости от его поперечного сечения.....	120
Список литературы .....	124