

Оценка влияния масштабного фактора на взаимосвязь акустической добротности и прочности горных пород

Я.О. Куткин¹, А.С. Вознесенский^{1,*}, М.Н. Красилов¹, М.Н. Тавостин², Ю.В. Осипов¹
¹Горный институт (МГИ) НИТУ «МИСиС», Россия, 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 4
²ООО «Газпром геотехнологии», Россия, 123290, Москва, улица 1-я Магистральная, д. 11/2
 (Статья поступила 12.11.2014; Подписана в печать 28.11.2014)

Рассмотрены эмпирические взаимозависимости кинематических и динамических акустических характеристик горных пород различных генотипов с их прочностными свойствами. Ввиду малого количества исследований связей акустической добротности и прочности горных пород им уделено особое внимание. Показано, что меньшие значения акустической добротности соответствуют меньшим значениям предела прочности горных пород, т. е. они связаны друг с другом. На примере образцов известняка различной длины показано незначительное влияние масштабного фактора на взаимозависимости акустической добротности и остаточной прочности. Указанные зависимости могут быть использованы для оценки неразрушающими методами остаточной прочности горных пород и ресурса подземных сооружений.

PACS: 43.35.+d, 91.60.Lj УДК: 534.286.2: 534.283.2: 620.111.3: 620.178.3

Ключевые слова: акустическая добротность, остаточная прочность, горные породы, взаимосвязь, прогнозирование, неразрушающий контроль, ресурс.

ВВЕДЕНИЕ

Взаимосвязям акустических и механических свойств горных пород посвящено значительное количество публикаций. Это обусловлено как важностью самой тематики, так особенностями и неповторимостью типов, генезиса и мест происхождения пород. Для большинства проводимых исследований характерным является то, что изучаются либо только акустические [1–5], либо только механические свойства пород [6–11]. Совместные исследования акустических и механических свойств ограничиваются, как правило, взаимосвязями упругих и акустических свойств [12], прочностных свойств и скоростей упругих волн [13, 14], а также взаимосвязями деформационных характеристик горных пород и скоростей упругих волн [15, 16]. В [1] приведены результаты исследований акустической добротности в материалах с высокой концентрацией внутренних дефектов во взаимосвязи с напряженным состоянием, однако ее связь с пределом прочности не рассматривается.

Ссылки на эти публикации, отражающие результаты отдельных исследований механических, акустических свойств, а также их взаимосвязей между собой, для наглядности сведены в табл. 1.

Как следует из данных этой таблицы, взаимосвязям прочностных и динамических акустических свойств горных пород, таких, как акустическая добротность и прочность, уделяется недостаточно внимания. В то же время такие взаимосвязи важны для прогнозирования предела прочности пород σ_{ucs} по измерениям их акустической добротности Q . Измерение последней позволит без разрушения определять остаточную

прочность и ресурсы зданий, сооружений, а также конструктивных элементов систем разработки на горных предприятиях, что важно для обеспечения эффективной и безопасной добычи полезных ископаемых [17, 18].

Рассмотрим такие взаимосвязи $\sigma_{ucs}(Q)$ на примере результатов испытаний образцов известняка и других пород с целью оценки остаточной прочности пород по их акустической добротности.

1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперименты включали в себя механические и акустические испытания образцов горных пород, имеющих форму параллелепипедов с размером основания 32x32 мм и высотой 64 мм. Механические испытания предусматривали определение предела прочности образцов горных пород при одноосном сжатии с различной степенью поврежденности, вносимой усталостным циклическим механическим нагружением. Акустические испытания включали измерение добротности пород, а также скоростей продольных и поперечных упругих волн. Для сравнения внесение поврежденности в образцы осуществлялось также нагреванием до различных температур.

Определение предела прочности и циклические нагружения производились на универсальной испытательной машине Instron 300DX серии SATEC, а скоростей продольной и поперечной волн — в диапазоне частот 50–200 кГц на измерительном приборе «Ультразвук», выпускаемом ООО «ЭкогеосПром» [19]. Нагревание образцов для внесения поврежденности происходило на экспериментальной установке [20] с трубчатой печью.

При проведении экспериментов была опробована методика [21] определения акустической добротности Q

*E-mail: a148@mail.ru

Таблица I: Исследования акустических и механических свойств, а также их взаимозависимостей для горных пород

		Акустические свойства [1, 2, 3]	
		Скорости упругих волн (кинематические характеристики) [4, 5]	Коэффициент затухания, добротность, декремент затухания (динамические характеристики) [13]
Механические свойства [6, 7, 8, 9]	Деформационные [10]	[15, 16]	[1]
	Прочностные [11]	[13, 14]	–

путем измерения резонансной частоты и ширины полосы частот вблизи резонанса при прозвучивании образца гармоническим сигналом по формуле

$$Q = \frac{f_0}{f_{\max} - f_{\min}},$$

где f_0 — резонансная частота, определяется по максимуму амплитуды гармонического сигнала, прошедшего через образец; f_{\max} , f_{\min} — верхняя и нижняя частоты полосы пропускания сигнала на уровне $1/\sqrt{2}$ от максимального значения амплитуды при резонансе. Фото установки и схема измерений по этой методике представлена на рис. 1.

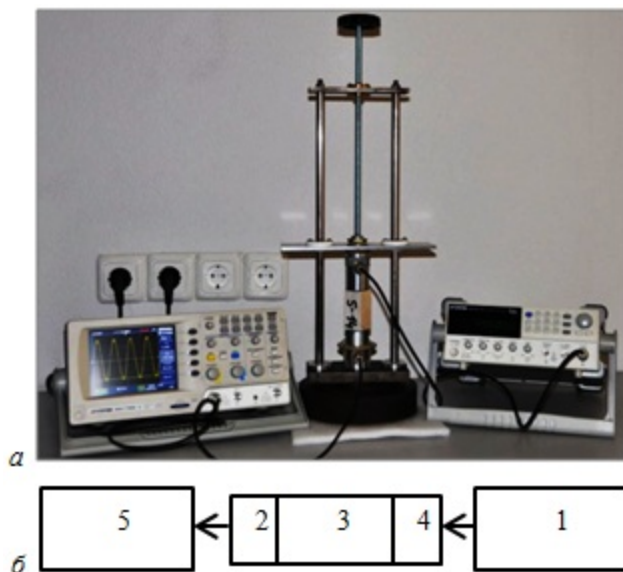


Рис. 1: Фото установки (а) и схема измерения (б) акустической добротности: 1 — генератор GW INSTEK SFG-2110, 2, 4 — преобразователи ультразвуковые, 3 — образец, 5 — осциллограф цифровой GW INSTEK GDS-71022

Ориентировочное значение резонансной частоты определялось через предварительно измеренное значение скорости

$$f_0 = \frac{v}{2h},$$

где v — скорость распространения продольных упругих волн; h — база прозвучивания образца. Затем это значение уточнялось уже при прозвучивании образца и определении добротности.

К достоинствам этой методики по сравнению с другими следует отнести возможность проведения измерений на одном образце, стабильность показаний. Необходимым условием является использование высокостабильного генератора. Этому условию отвечают современные перестраиваемые генераторы с кварцевой стабилизацией частоты, поддерживающие ее заданное значение при измерениях в области резонанса.

Необходимым условием всех перечисленных выше вариантов измерений является высокая собственная добротность преобразователей, что особенно необходимо при измерениях на высокочастотных породах, как, например, долериты и габбро.

2. СВЯЗИ АКУСТИЧЕСКОЙ ДОБРОТНОСТИ И ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД С ПОВРЕЖДЕННОСТЬЮ ГЕОМАТЕРИАЛА И МЕЖДУ СОБОЙ

А. Зависимости акустической добротности и остаточной прочности от количества усталостных циклов для образцов известняка

Взаимозависимости между акустической добротностью и остаточной прочностью горных пород исследовались при различной степени их поврежденности, вносимой периодическими усталостными циклами нагрузка-разгрузка. Как правило, большее количество таких циклов приводило к большей степени поврежденности геоматериала, хотя для такой породы как мрамор наблюдалась и другая закономерность, описанная ниже.

Методика испытаний включала измерения акустической добротности Q методом резонансной спектроскопии при прозвучивании, внесение поврежденности циклами нагрузка-разгрузка, определение предела прочности σ_{ucs} при одноосном сжатии образцов. Затем строились зависимости измеряемых параметров Q и σ_{ucs} от количества усталостных циклов N и искомые взаимозависимости $\sigma_{ucs}(Q)$.

Испытывались две группы образцов известняка месторождения Тигинское (Россия). При разбивке на группы для получения более стабильных результатов была учтена закономерность, согласно которой большему пределу прочности соответствуют большие значения скоростей упругих волн. В первую группу, испытанную затем при максимальном значении циклической нагрузки до 0,3 от разрушающей, были отобраны образцы с меньшими значениями скоростей, а во вторую, испытанную при нагрузке до 0,5 от разрушающей, — с большими значениями скоростей распространения упругих волн, что соответствовало меньшим и большим прогнозным значениям предела прочности.

Количество циклов нагрузка-разгрузка N в первой группе составляло 0, 10, 20, 30, 40. При $N > 40$ образцы разрушались уже в процессе усталостного нагружения. Для образцов второй группы количество циклов нагрузка-разгрузка N было равно соответственно 0, 10, 15, 20, 30. Несмотря на то, что в эту группу были отобраны образцы с большими значениями прогнозного предела прочности при одноосном сжатии, образцы разрушались уже при количестве циклов нагрузка-разгрузка $N > 30$. Т.е. уровень максимальной нагрузки при усталостном внесении поврежденности оказывает существенное влияние на остаточную прочность.

При испытаниях регистрировались значения добротности Q и остаточной прочности σ_{ucs} , соответствующие определенному количеству усталостных циклов. Затем строились графики зависимостей второй величины от первой, а также этих величин от количества циклов N .

На рис. 2 представлены зависимости акустической добротности Q и остаточной прочности σ_{ucs} от количества циклов нагрузка-разгрузка N .

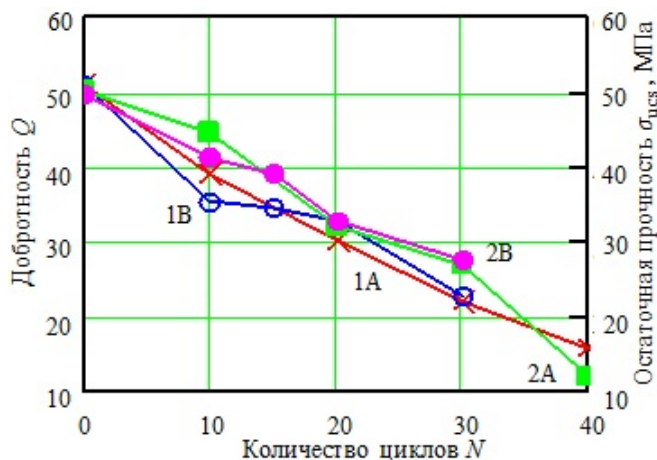


Рис. 2: Графики зависимостей акустической добротности (1) и остаточной прочности (2) от количества циклов нагрузка-разгрузка для образцов известняка месторождения Тигинское при максимальной нагрузке в циклах до 0,3 (А) и 0,5 (В) от разрушающей

Как следует из этих графиков, проявляется достаточно хорошая повторяемость кривых, соответствующих

различным группам образцов при различных уровнях усталостного нагружения и количестве циклов.

В. Зависимости акустической добротности и остаточной прочности от количества усталостных циклов для образцов мрамора

При исследовании зависимостей акустической добротности и остаточной прочности от количества усталостных циклов мрамора одного из месторождений острова Тассос (Thassos, Греция), было установлено отличие характера изменения изучаемых свойств от аналогичных свойств пород для известняка.

Как следует из графиков, приведенных на рис. 3, закономерность, заключающаяся в том, что при увеличении количества циклов нагрузка-разгрузка также увеличивается поврежденность геоматериала и снижается предел прочности, наблюдается только при сравнительно небольшом количестве циклов, в данном случае до 50. Затем происходит увеличение прочности и соответствующее ему увеличение добротности.

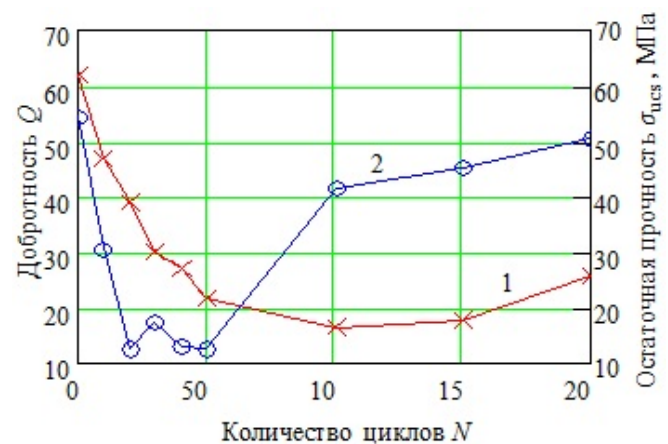


Рис. 3: Зависимости добротности Q (1) и остаточной прочности σ_{ucs} (2) от количества циклов N усталостного нагружения для мрамора месторождения Тассос (Thassos)

Подобное явление увеличения прочности мрамора при усталостных испытаниях может быть объяснено уплотнением и упрочнением его структуры. Этого не наблюдается у известняка, поскольку при числе усталостных нагружений более 2–20 происходит разрушение образцов. Возрастание прочности и акустической добротности у мрамора может объясняться восстановлением внутренних связей между минеральными зёрнами под давлением, что не происходит у известняка.

Отмечена также и другая особенность. Увеличение добротности при 150–200 циклах «отстает» от увеличения прочности, которое отмечено при 100–200 циклах. В этом проявляется особенность взаимосвязи добротности и прочности геоматериала, а именно: при увеличении нарушенности добротность уменьшается рань-

ше, чем уменьшается прочность, а при уменьшении нарушенности она «запаздывает» и проявляется позже. Т.е. добротность проявляет высокую чувствительность к нарушенности на начальных стадиях разрушения геоматериала, что существенно для прогнозирования прочности последнего по измерениям добротности.

С. Сравнительный анализ взаимосвязей между акустической добротностью и остаточной прочностью для различных типов горных пород

Зависимости акустической добротности и остаточной прочности пород от количества циклов нагружения, приведенные выше, позволяют построить взаимозависимости между акустической добротностью Q и остаточной прочностью σ_{ucs} .

Такие зависимости для известняка Тигинского месторождения при различных уровнях нагружения в усталостных циклах, а также травертина показаны на рис. 4. Кроме того для сравнения здесь показана взаимозависимость между добротностью и остаточной прочностью известняка Касимовского месторождения, испытанного при нагревании.

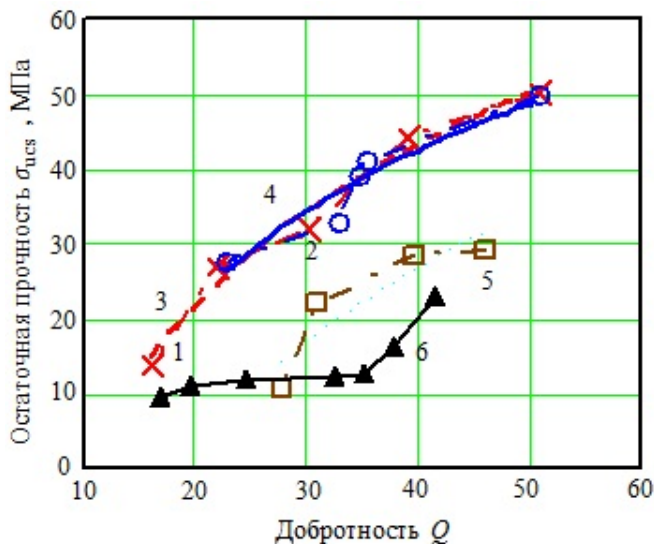


Рис. 4: Взаимозависимости между добротностью Q и остаточной прочностью σ_{ucs} известняка Тигинского месторождения при максимальных механических нагрузках в цикле 0,3 (1) и 0,5 (2) от предела прочности с аппроксимирующими кривыми (3 и 4 соответственно), травертина (5) региона Денизли, Турция, при нагрузке в цикле 0,1 от предела прочности и известняка Касимовского месторождения (6), испытанного при нагревании

Как следует из графиков, приведенных на рис. 4, для известняков Тигинского месторождения при больших значениях добротности и прочности степень изменения второй величины меньше, чем первой, как это было показано ранее. Эти связи могут быть аппроксимирова-

ны логарифмической зависимостью, для первого случая она имеет вид

$$\sigma_{ucs} = 31,11 \times \ln(Q) + 71,44,$$

для второго она аналогична

$$\sigma_{ucs} = 28,34 \times \ln(Q) + 62,03,$$

при коэффициентах детерминации $R_1^2 = 0,98$ и $R_2^2 = 0,92$ соответственно. Обе зависимости близки друг к другу и отличаются незначительно, что свидетельствует о малом влиянии уровня механического нагружения при усталостных циклах.

Форма кривой зависимости остаточной прочности от добротности образцов известняка Касимовского месторождения (Россия), испытанного авторами при нагревании (рис. 4, кривая 6), отличается от кривых, полученных при механическом нагружении. Вначале наблюдается резкое уменьшение предела прочности по сравнению с добротностью, затем сравнительно малое уменьшение прочности при значительном уменьшении добротности. Это обусловлено различным характером разрушений в каждом случае.

Изменение прочности при механическом нагружении может быть описано с позиций двухстадийной модели кинетической теории прочности, согласно которой на первой стадии разрушения геоматериала микротрещины образуются равномерно по всему объему, не снижая значительно прочность. При этом акустическая добротность, реагируя на потери в среде из-за образующихся трещин, показывает существенное свое уменьшение. На прочность развитие микротрещиноватости оказывает меньшее влияние. На следующей стадии происходит группирование трещин в кластеры, приводя уже к существенному снижению прочности. Но поскольку количество трещин нарастает с той же скоростью, акустическая добротность уменьшается приблизительно также, как и на первой стадии.

При нагревании наблюдаются другие механизмы, связанные с разрушением отдельных связей в материале, вызванные как механическими, так и химическими преобразованиями. Такие разрушения влияют на прочность в большей степени, чем микротрещины при механическом нагружении, что и определяет различие формы кривых.

Для мрамора, демонстрирующего переменный характер изменения прочности в зависимости от количества циклов усталостного нагружения, ход кривой $Q - \sigma_{ucs}$, изображенной на рис. 5, сложнее, чем для известняка. На такой кривой отчетливо выделяются участки $A-D$, соответствующие снижению, постоянному значению и возрастанию прочности.

Аппроксимация первого участка A , на котором происходит снижение как добротности, так и прочности, дает следующую зависимость

$$\sigma_{ucs} = 46,49 \times \ln(Q) + 64,87,$$

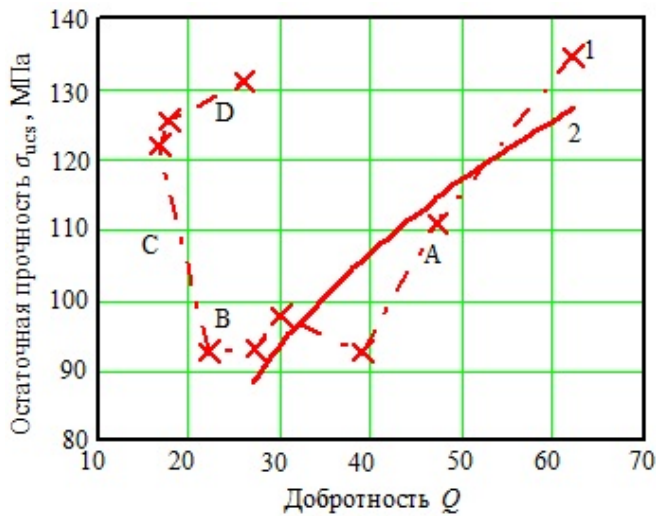


Рис. 5: Взаимозависимость между акустической добротностью Q и остаточной прочностью σ_{ucs} мрамора месторождений острова Thassos (1) и аппроксимирующая кривая ее первого участка (2); а кривой 1 обозначены участки: *A* — одновременного уменьшения прочности и нагрузки; *B* — постоянного значения прочности; *C* — возрастания прочности при уменьшении добротности; *D* — возрастания прочности при увеличении добротности

при коэффициенте детерминации $R_2 = 0,79$, который демонстрирует меньшее значение, чем у пород, описанных выше. Это обусловлено различием форм кривых взаимозависимостей добротности и остаточной прочности.

Таким образом, породы различных типов демонстрируют различные типы зависимостей между акустической добротностью Q и остаточной прочностью σ_{ucs} . Это обусловлено соотношением процессов разрушения и восстановления геоматериала. В любом случае зависимости первого участка на практике могут быть использованы для прогнозирования остаточной прочности конструктивных элементов различных объектов без их разрушений путем измерения добротности Q . Такими объектами являются, например, целики и кровля подземных горных выработок, разрушение которых может иметь катастрофические последствия.

3. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МАСШТАБНОГО ЭФФЕКТА ВЗАИМОЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ПРОЧНОСТЬЮ И ДОБРОТНОСТЬЮ НА ОБРАЗЦАХ РАЗЛИЧНОЙ ДЛИНЫ

Для практического использования приведенных выше закономерностей необходимо установить влияние масштабного фактора. Если это влияние невелико, то зависимости, полученные на образцах, можно перенести на натурные объекты, введя при необходимости поправочные коэффициенты. Указанная задача решалась экспериментальным путем.

Эксперименты проводились на образцах известняков Касимовского месторождения. Образцы имели одинаковое основание размером 20x20 мм и различную высоту от 40 до 120 мм. Методика испытаний образцов описана выше. Были произведены одна серия экспериментов с исходными образцами без их усталостного нагружения и три серии при количестве циклов усталостного нагружения 30, 40 и 50.

На рис.6 представлены зависимости остаточной прочности σ_{ucs} и добротности Q от длины образцов l , не подвергавшихся нагружению. Увеличение длины приводит, в целом, к незначительному уменьшению, как предела прочности, так и добротности. Это может объясняться тем, что при большей длине образца количество нарушений различного вида (трещины, полости и др.) возрастает, что влияет на обе величины.

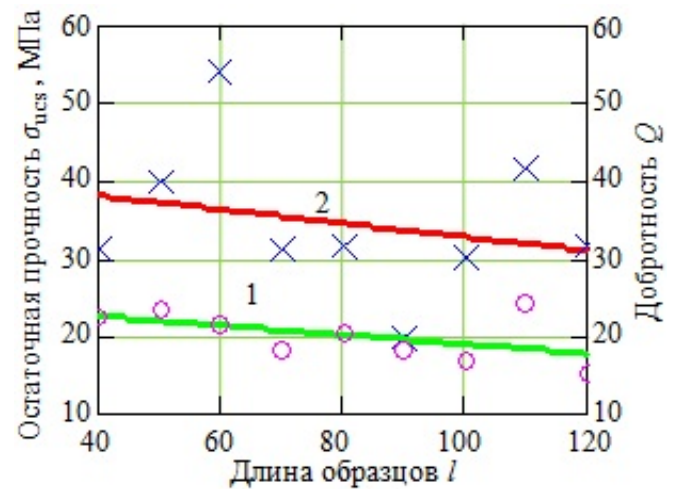


Рис. 6: Зависимости акустической добротности (1, кружки) и прочности (2, крестики) от длины образцов без их нагружения

Графики взаимозависимостей между добротностью и остаточной прочностью для образцов длиной 40 мм и 120 мм, а также графики, построенные по объединенной выборке при числе усталостных циклов 0, 20, 30, 50 представлены на рис. 7.

По полученным результатам можно сделать следующие выводы. Значения прочности и добротности для образцов длиной 120 мм меньше, чем для образцов длиной 40 мм. В то же время аппроксимирующие прямые для образцов 40 мм и 120 мм близки друг к другу, вторая с определенной степенью приближения может служить продолжением первой. Они близки также и к прямой, построенной по объединенной выборке. Последняя может быть взята в качестве регрессионной линии, по которой можно пересчитать значения добротности в величину предела прочности. Это говорит о слабом влиянии масштабного фактора.

Как и ранее, при увеличении количества усталостных циклов обращает на себя внимание значительное уменьшение добротности: в 1,4 раза для образцов высотой 40 мм и в 1,8 раза — 120 мм, а по

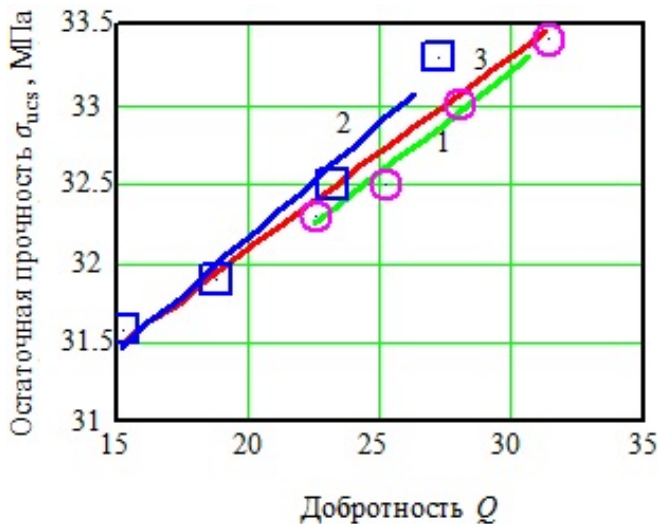


Рис. 7: Взаимозависимости между добротностью и остаточной прочностью для образцов длиной 40 мм (1, кружки), 120 мм (2, квадраты) и построенные по обобщенной выборке (3) при числе усталостных циклов 0, 20, 30, 50

объединенной выборке в 2,1 раза. При этом прочность по объединенной выборке уменьшилась лишь в 1,06 раза. Т.е. проявляется высокая чувствительность добротности по отношению к прочности и внутренней поврежденности на ранних стадиях усталост-

ного разрушения геоматериала.

Можно сделать вывод о том, что масштабный эффект при изменении длины образцов в 3 раза не сказывается в значительной степени на взаимосвязях добротности и прочности пород.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что между пределом прочности при одноосном сжатии горных пород и их акустической добротностью существует пропорциональная взаимозависимость, позволяющая осуществлять косвенную оценку первой величины путем измерения второй, не разрушая объект контроля.
2. Полученные экспериментальные данные показали, что масштабный эффект при изменении длины образцов в 3 раза не сказывается в значительной степени на взаимосвязях добротности и прочности пород. Это дает основание предположить возможность использования данных зависимостей, полученных на образцах, для прогнозирования остаточной прочности и ресурса реальных объектов. Однако это заключение требует дальнейшей практической проверки.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 14-05-00362 а).

- [1] Лебедев А.В., Островский Л.А., Сутин А.М., Соустова И.А., Джонсон П.А. Акустический журнал. **49**, № 1. С. 92. (2003).
- [2] Tittmann B.R., Abdel-Gawad M., Housley R.M. Elastic velocity and Q factor measurements on Apollo 12, 14, and 15 rocks. Proceedings of the Third Lunar Science Conference (Supplement 3, Geochimica et Cosmochimica Acta). **3**, P 2565. (The M.I.T. Press, 1972).
- [3] Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. (М.: Наука, 2003). 270 с.
- [4] Шкуратник В.Л., Данилов Г.В. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. № 3. С. 3. (2005).
- [5] Данилов В.Н., Шкуратник В.Л., Сирота Д.Н. Изв. вузов. Горный журнал. № 2. (1988).
- [6] Карташов Ю.М., Матвеев Б.В., Михеев Г.В., Фадеев А.Б. Прочность и деформируемость горных пород. (М.: Недра, 1979). 272 с.
- [7] Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика горных пород: Учеб. для вузов. (М.: Недра, 1975). 208 с.
- [8] Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. (СПб.: Наука, 2001). 343 с.
- [9] Katz O., Reches Z., Roegiers J.-C. Int. J. Rock Mech. and Mining Sci. **37**, № 4. P. 723. (2000).
- [10] Сукнев С.В. Горный информационно-аналитический бюллетень. № 8. С. 101. (2013).
- [11] Hongjun L., Xianchun Ch., Jiefeng M. Journal of Northeast Forestry University. Issue 2. P. 102. (2005).
- [12] Ulrich T.J., McCall K.R., Guyer R.A. J. Acoust. Soc. Amer. **111**, N 4. P. 1667. (2002).
- [13] Keshavarz M., Pellet F.L., Loret B. Pure and Applied Geophysics. N 167. P. 1511. (2010).
- [14] Pellet F.L., Fabre G. International journal of geomechanics. **7**, N 6. P. 431. (2007).
- [15] Бельтюков Н.Л., Евсеев А.В. Вестн. ПГТУ. Геол., геотехн. системы, горно-нефт. дело. № 5. С. 82. (2010).
- [16] Бельтюков Н.Л., Паньков И.Л. Изучение скорости прохождения продольных волн при деформировании силикатных образцов. Геология и полезные ископаемые Западного Урала: Материалы Региональной научно-практической конференции. Пермь, 19-20 мая 2009. С. 399. (Пермь: ПермГУ, 2009).
- [17] Вознесенский А.С., Куткин Я.О., Красилов М.Н. О возможности оперативной оценки состояния анкерного крепления и кровли подземных горных выработок акустическими методами. Наукові праці УкрНДМІ НАН України. Випуск 13 Частина I С. 183. (Донецьк: УкрНДМІ НАН України, 2013).
- [18] Вознесенский А.С., Куткин Я.О., Красилов М.Н. О возможности определения резерва прочности анкерного крепления кровли методами неразрушающего контроля. Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Труды XX Всероссийской конференции с участием иностранных ученых. **I**, С. 337. (Новосибирск, 2013).
- [19] Прибор для определения скорости прохождения упругих

акустических волн «Ультразвук» [Электронный документ] <http://www.ecogeospro.ru/product/issled/acustik/>
 [20] Вознесенский А.С., Шкуратник В.Л., Вильямов С.В. Винников В.А. Горный информационно-аналитический

бюллетень. № 12. С. 143. (2007).
 [21] Куткин Я.О. Горный информационно-аналитический бюллетень. № 12. С. 346. (2014).

The scale factor influence on the interrelation of the acoustic quality and rock strength

Ya.O. Kutkin¹, A.S. Voznesenskii^{1,a}, M.N. Krasilov¹, M.N. Tavostin², Y.V. Osipov¹

¹*Mining institute (MGI) of the National University of Science and Technology «MISIS» (MISIS). Leninskiy prospect, 4, Moscow, Russia*

²*LLC «Gazprom geotechnology» 11/2, 1st Magistralnaya St., 123290 Moscow, Russia
 E-mail: ^aal48@mail.ru*

Empiric kinematic and dynamic acoustic characteristic of different genotypes rocks and their strength properties interdependence have been consider. Due to the small amount of researching the acoustic quality factor and the strength of rocks interdependencies they receive special attention. It is shown that the smaller value of the acoustic Q-value corresponds to the smaller tensile strength of rock. They are connected with each other. It has been shown on the example of the limestone samples of different lengths the insignificant influence of the scale factor on the interdependence of the acoustic quality factor and residual strength. These dependencies can be used for non-destructive evaluation techniques of the rock strength and resources of underground structures.

PACS: 43.35.+d, 91.60.Lj

Keywords: acoustic quality factor, residual strength, rocks, interrelation, forecasting, nondestructive testing, resource.

Received 12.11.2014.

Сведения об авторах

1. Куткин Ярослав Олегович — аспирант кафедры ФТКП; тел.: +7(916)247-33-06, e-mail: kutnew@mail.ru.
2. Вознесенский Александр Сергеевич — докт. техн. наук, профессор; тел.: +7(910)409-94-93, e-mail: al48@mail.ru.
3. Красилов Максим Николаевич — студент 5 курса кафедры ФТКП; тел.: +7(965)153-56-31, e-mail: krasilov.maksim.93@mail.ru.
4. Осипов Юханна Владимирович — аспирант кафедры ФГПиП; тел.: +7(903)712-95-58, e-mail: yuhanna@list.ru.