

## Приповерхностные градиенты качества пород, модули деформации, $V_p$ и $Q_p$ на глубине до 1 км. Near-surface gradients of rock quality, deformation modulus, $V_p$ and $Q_p$ to 1 km depth

Ник Бартон\*

### Введение

На участках распространения твердых пород, на глубине около 50 м от поверхности могут присутствовать почвы, выветрелые трещиноватые породы, и все более твердые породы по мере увеличения глубины. Из опытов по сейсмическому преломлению, нам известно, что существует аномальный градиент скорости в этой зоне. Это так, даже если мы игнорируем скачок Р-скорости сейсмических волн,  $V_p$ , на зеркале воды. Есть много разумных объяснений роста скорости с глубиной. Они включают увеличение давления, увеличение плотности горной породы потому, что в породе меньше выветривания, меньше мелких трещин, меньше глинизация и обычно уменьшенная частотность трещин.

Помимо аномально высоких градиентов скорости в верхних 25 м, достигающих двузначных чисел, при измерении в единицах  $\text{с}^{-1}$ , отмечено увеличение качества массива пород  $Q$ , соответствующее увеличению деформации модуля  $E_{mass}$  массива пород, и поэтому также отмечено увеличение в сейсмической добротности для Р-волн,  $Q_p$ .

Градиенты скорости и добротности по глубине вообще уменьшают свой наклон на глубине приблизительно 100-200 м, но корреляция между параметрами пород и этими сейсмическими параметрами рассматривается нами для глубин до 1 км, интересных для гражданского строительства и многих горнодобывающих приложений. Важность этих связей состоит в сейсмических параметрах  $V_p$  и  $Q_p$ , которые могут быть определены из съемок МПВ и межскважинной томографии, при исследованиях участка под буровую площадку и может использоваться, для оценки параметров массива пород  $Q$  и  $E_{mass}$ , которые необходимы для технического проектирования. Применения включают землеройные работы в горной породе хорошего качества, выветрелой породе, и более пористых, более слабых горных породах (Barton, 2006).

В этой статье, эмпирические отношения между параметрами массива пород, используемые для технического проектирования и сейсмические параметры представлены в отношении к базам данных, из которых они

были получены. Ниже, первая глава вводит технические параметры массива породы. Далее следуют отдельные главы и соотношения между  $V_p$  и параметрами массива пород на малых и больших глубинах, до 1 км, и между  $Q_p$  и параметрами массива пород. Наконец, соотношения иллюстрированы реальными примерами.

### Параметры массива пород в технике

Добротность массива пород, обозначаемая  $Q$ , введенная Бартоном и др. (1974) является одним из стандартных международных методов классификации технического качества массива пород, используемая прежде всего для выбора подходящих соединений торкрет-бетона и анкерных болтов для укрепления массива пород в туннелях и кавернах, и для обеспечения входных данных для числовых моделей. Она определяется из поверхностного каротажа и кернового каротажа массива в диапазоне от 0.001 до 1000. Качество пород  $Q$  определяется как

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

где RQD - обозначение качества горной породы, определенное соотношением соответствующего добытого керна к длине > 10 см;

значение  $J_n$  зависит от числа общих трещин;

значение  $J_r$  зависит от общей шероховатости;

значение  $J_a$  зависит от степени общего изменения состава пород и содержания глин;

значение  $J_w$  зависит от количества притока воды или давления; и

SRF - коэффициент уменьшения напряжения, который включает эффект ослабления из-за разломов, а также коэффициент отношения напряжение/сжатие в случае массивной породы, которая может трескаться под высоким напряжением.

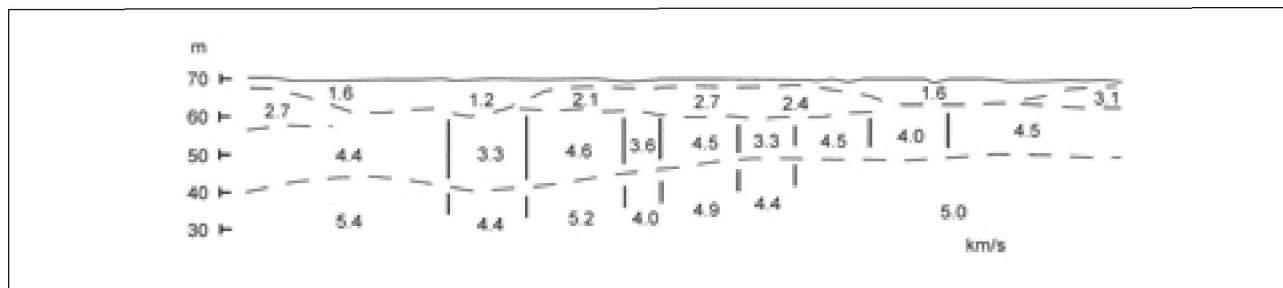


Рис 1 Пример сильных градиентов скорости Р-волн, отмеченных при проведении работ МПВ в твердой породе, на участке с низкой пористостью в Скандинавии (от Sjogren, 1984).

\*Fjordveien 65c, 1363, Hovik, Norway; E-mail: nickrbarton@hotmail.com.

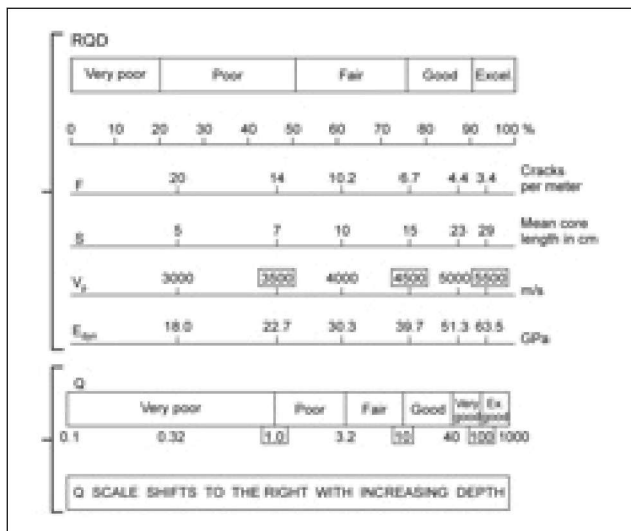


Рис 2 Средние  $V$  и данные трещин из отобранного керна (от Sjogren и др., 1979). Эти данные были получены для твердых изверженных и метаморфических горных пород с ограниченным выветриванием и низкой пористостью. Масштабы качества массива пород  $Q$  были добавлены Бартоном (1995).

Детальные данные для этих шести параметров на правой стороне уравнения (1) громоздки, чтобы использоваться здесь, но сведены в таблицу Бартоном (2002, 2006). Эти значения были получены в 1970-ые путем исчерпывающего метода проб и ошибок, для 200 случаев применения.

В основном, отношение трех пар параметров описывает размер блока, трение в блоке, и эффективное напряжение, плюс специальные условия, данные SRF.

Для корреляции с параметрами  $E_{mass}$ ,  $V_p$  и  $Q_p$  предпочтительно нормализовать качество массива пород как  $Q_c$ , определенное

$$Q_c = Q \times \frac{\sigma_c}{100}$$

где  $Q_c$  - одноосное компрессионное растяжение в МПа образца керна, обычно 50 мм в диаметре. Таким образом, когда  $Q_c$  имеет значение 100 МПа, которое является традиционным для средне-твердой горной породы, где  $Q_c = Q$ . Величина  $Q_c$  показывает улучшенную обратную зависимость от проницаемости в низко пористой породе, где отсутствует глина.

Как разработчики оценки  $Q$  качества массива пород, (Barton и др., 1974), мы не имели никакого понятия о широко используемом в геофизике  $Q_p$ , параметре, который связан обратно пропорционально с затуханием и частично независим от сейсмического диапазона частот в массивных твердых породах. Это аналогично тому, что геофизики, которые используют  $Q_p$  вообще, не знают о качестве горной породы  $Q$ . Однако, эти два основных параметра массива пород,  $Q$  и  $Q_p$ , оказывается, близко связаны, как будет продемонстрировано ниже.

Модуль деформации массива пород  $E_{mass}$  - параметр, используемый для описания поведения массива породы, для относительно прямых измерений. Это - важный входной параметр для численного моделирования массива горной породы

для добычи.  $E_{mass}$  определен как отношение нормального напряжения по отношению к нормальной деформации в течение нагрузки массива породы, включая упругое и неупругое поведение и обычно ошибку в диапазоне от 0.1 до 100 ГПа. Это традиционно отличается от упругого модуля Юнга, который является отношением нормального напряжения к нормальной деформации ниже предела упругости горной породы.

Лабораторные испытания на небольших образцах породы - очевидно, не соответствуют определению  $E_{mass}$ , поэтому необходим контроль *in situ* на крупных образцах. Традиционно используются штамповые испытания. Они включают в себя применение к поверхности массива породы гидравлических домкратов или горизонтальных домкратов, и измерение полученной деформации.

Есть другие маломасштабные типы внутрипластовых тестов, типа подъемных работ в буровой скважине и дилатометрический тест, которые могут иметь более высокие модули, которые менее уместны для моделирования.

В технике горных пород, требуется определять оценки проницаемости, необходимые для цементации массива породы. Проницаемость измерена в единицах Lugeon, основанных на испытании воды в стволе скважины, запечатанных пакерами, и в этом контексте им присвоен символ  $L$ . Одна единица Lugeon определена как вода взятая из 1 литра в минуту на расстояние метра в буровой скважине при избыточном давлении 10 баров, и приблизительно равняется проницаемости  $1.3 \times 10^{-7} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  для пористой среды.

Она часто близка к  $10^{-7} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  в проектах по разработке. Единица была первоначально создана для определения герметичности на участках дамбы, где необходимость цементации была оценена по проницаемости превышающей 1 Lugeon. Чем ниже проницаемость, может требоваться цементация с высоким давлением с микроцементом, для уменьшения притока, когда имеется связь с нижними пластами со средой с проницаемыми свойствами. Геофизики-нефтяники более знакомы с единицей Дарси для проницаемости, где 1 дарси =  $10^{-12} \text{ м}^2$ . В случае воды для  $20^\circ\text{C}$ ,  $10^{-12} \text{ м}^2$  эквивалентно технической проницаемости горной породы  $\sim 10^{-5} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$

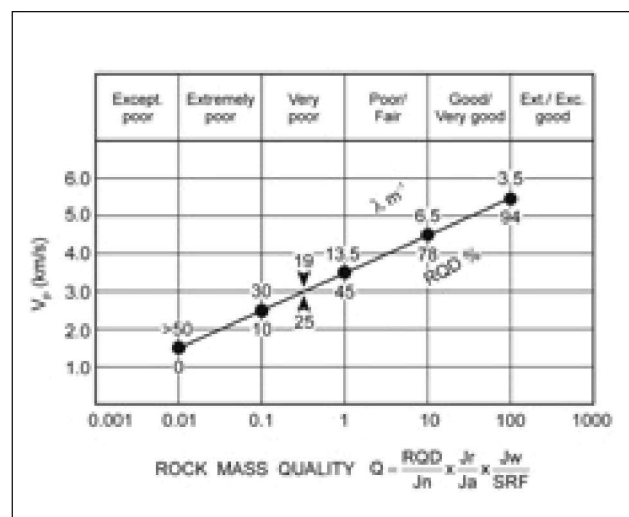


Рис 3 Синтез рис. 2, соответствующего уравнению (3), который связывает  $V$ , с качеством  $Q$  в приповерхностном слое.  $X$  (единицы  $\text{м}^{-1}$ ) представляет частоту трещин. Другие символы определены в тексте.

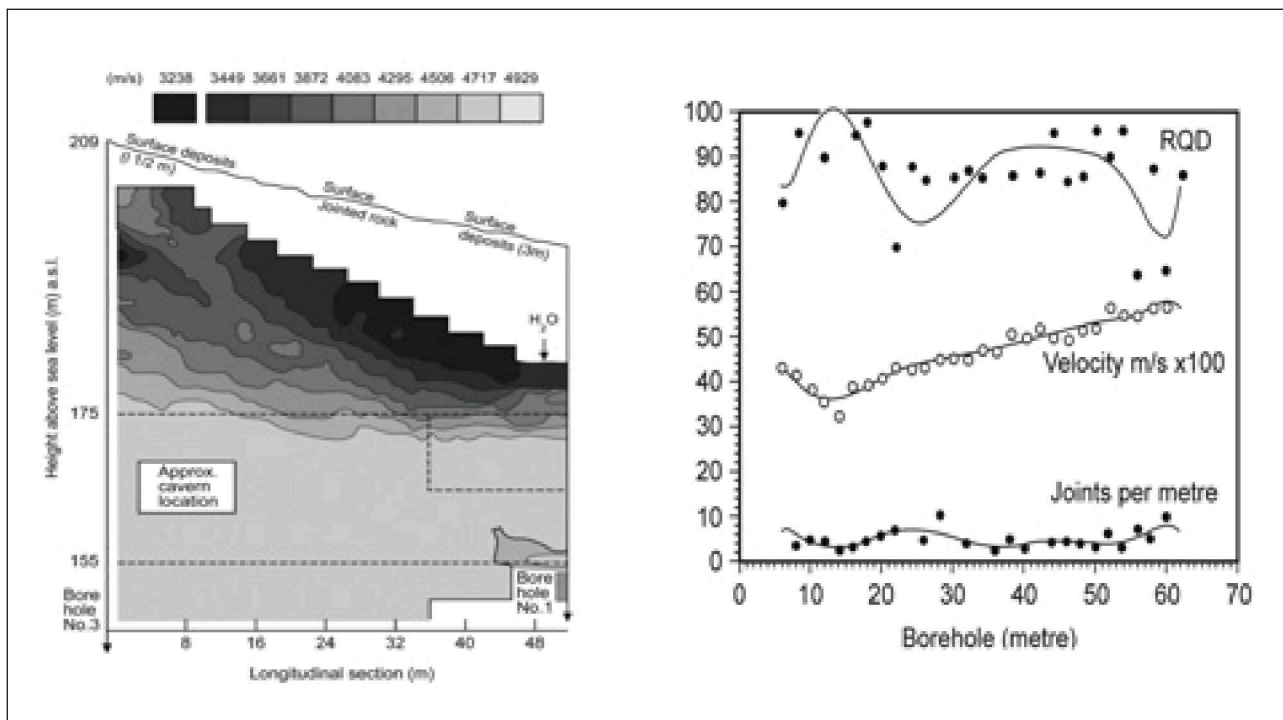


Рис 4 (а) Результат межскважинной сейсмической томографии, показывающий увеличение скорости с глубиной в трещинном гнейсе. (б) Скорость, RQD и объединенная частота в буровой скважине 3, на левой стороне томографической съемки (из Бартона и др., 1994).

### Добротность горных пород по сейсмическим скоростям на малой глубине

Рис 1 - интерпретация малоглубинного профиля МОВ показывает изменение  $V_p$  с глубиной (Sjögren, 1984). Очевидно, что здесь присутствуют надсолевые отложения. Такие профили являются типичными для предварительных данных перед строительством малоглубинных туннелей в твердой породе для случаев, где глубина выветривания ограничена.

Особенно полезный синтез многих таких приповерхностных скоростных данных, интерпретируемых вместе с локальными результатами основных методов каротажа, сообщались Sjögren и др. (1979).

Средние скорости Р-сейсмоволн и средние описания керна 74 пробуренных скважин, пробуренных на восьми участках твердых пород, расположенных в Скандинавии, основанные на 113 км сейсмических профилей, полученных методом МПВ и 2.9 км керна, воспроизведены на рис. 2. Горные породы были главным образом граниты, гнейсы, амфиболиты и кварциты с ограниченным выветриванием и низкой структурной пористостью.

Рассматривая данные малоглубинной сейсмики на Рис. 1, можно предложить несколько вопросов об увеличении значений скоростей с глубиной:

□ Как рост скорости с глубиной сказывается на увеличении  $Q$  (или  $Q_c$ )?

□ Вызывает ли рост скорости увеличение  $Q_p$ ?

□ Затрагиваются ли параметры,  $V_p$ ,  $Q$  (или  $Q_c$ ) и  $Q_p$  при увеличении напряжения с глубиной?

Это может быть отмечено на рисунке 2 и 3, на котором приведены малоглубинные участки твердых пород, где предварительные эмпирические отношения связывают скорость и качество добротности в приповерхностной зоне

$$V_p \approx 3.5 + \log Q$$

(3)

где единицы  $V_p$  - км с<sup>-1</sup>. Эти отношения действительны в традиционных глубинах исследования для сейсмических профилей, полученных методом МПВ при исследовании участков, например, глубины 20-30 м. Отметим подходящее увеличение 1 км с<sup>-1</sup> в  $V_p$  для каждого десятикратного увеличения  $Q$ .

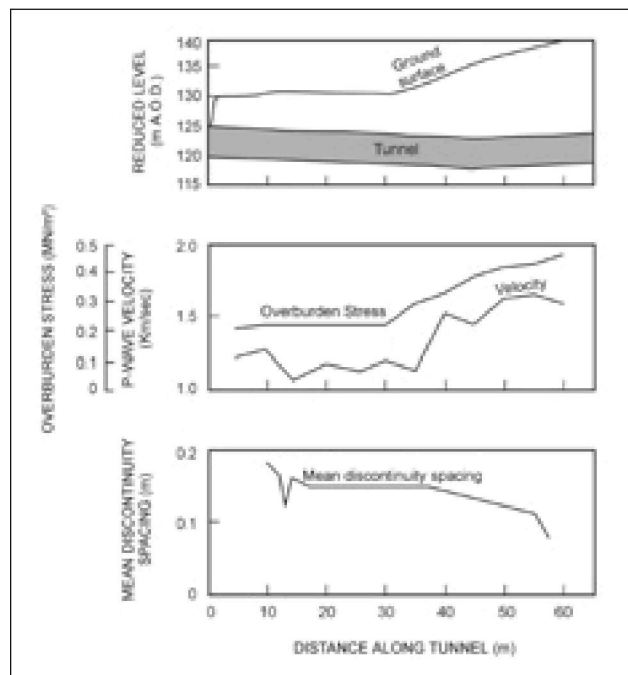


Рис 5 Пример эффекта глубины (или напряжения) на  $V_p$ . При увеличении частоты трещин с глубиной, скорость продолжает повышаться с увеличением давления перекрывающей породы (из Хадсона и др., 1980).

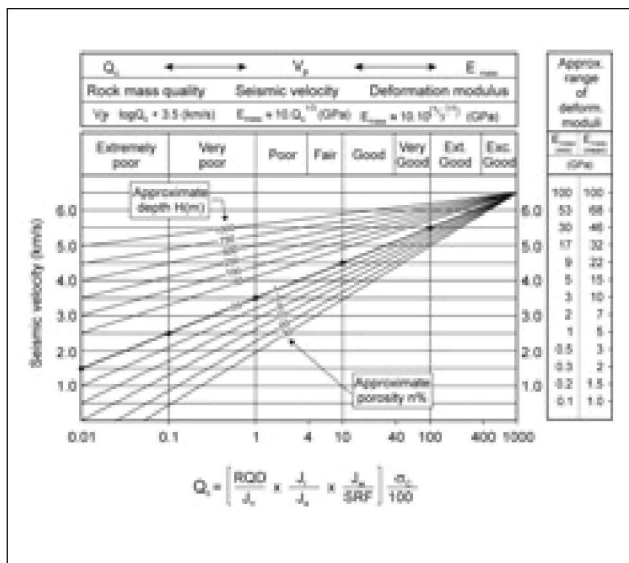


Рис 6 Корреляция Скорость-Глубина-Пористость- $Q_c$ - $E_{mass}$ , полученные по полевым записям и эмпирической кривой метода проб и ошибок (по Бартону, 2006).

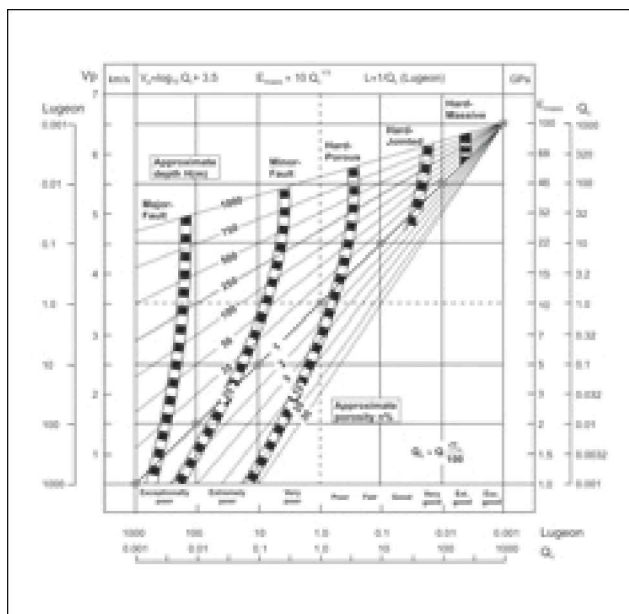


Рис 7 Развитие корреляций на рис. 6, с добавлением оценки проницаемости для случая разломной (но не пористой) горной породы. Кривые дают предварительные данные взаимосвязанных свойств 'земной науки', которые могут ожидать.

В следующей части эти связи будут обобщены для более широкого применения для выветренной горной породы, для пористой горной породы, и для больших глубин. В этой экстраполяции мы воспользуемся многочисленными сейсморазведочными работами, выполненными для изучения под глубокое основание дамбы, данными туннельных съемок, и съемки межскважинной сейсмической томографии, самая глубокая из которых, для более чем 1-километровой глубины. В каждом случае, изменения качества горной породы были также зарегистрированы на глубине, и позже показаны, чтобы прокоррелировать их со скоростными изменениями.

## Добротность горных пород по сейсмическим скоростям на большой глубине

Детальное развитие зависящих от глубины связей между  $Q_c$  и  $V_p$  были обработаны в течение нескольких лет, методом проб и ошибок, основанном на анализе туннельных участков, где детальное знание  $Q$  было получено из каротажа и где было выполнено обширное наложение сейсмической или межскважинной томографии. Часть из этих проектных работ была выполнена коллегами из Норвежского Геотехнического Института, Осло, в буровых скважинах больше чем 1 км глубиной, в течение ядерных инженерно-геологических исследований на участке строительства сброса отходов проводимых компанией Шелафилд для Нирекс в Великобритании. В общей сложности 8 км игнимбрита и туфа было исследовано на  $Q$  параметр для того проекта.

Ключевой целью в этой разработке должно стать установление степени, до которой скорость  $V_p$  увеличивается с глубиной в случаях, где не было никакого улучшения качества горной породы с глубиной. Существенные примеры этого более необычного состояния массива пород показываются на Рисунке 4 и 5, из исследований для каверны Gjøvik Olympic величинной 62 м в Норвегии (Бартон и др., 1994) и от исследовательского туннеля в трещиноватом меле, в Чиннор, в южной Англии (Хадсон и др., 1980). На участке Гжовик, межскважинная томография между несколькими парами буровых скважин показали, что скорость увеличивается с глубиной в трещиноватом гнейсе, как ожидается (рис. 4а). Там было ограниченное выветривание и ограниченный напочвенный покров.

Более близкий анализ показывает, что сильное увеличение скорости, превышающее первые 50 м (рис. 4b) не сопровождается любым очевидным увеличением качества массива пород или уменьшением в частоте по тому же самому интервалу.  $Q$  значение расположено приблизительно между 5 и 25 ('отличное' к 'хорошему' качеству) в подобной случайной манере к RQD и совместной частоте, и ни один из этих параметров не показал никакой последовательный тренд с глубиной. Однако проницаемость действительно уменьшалась с увеличением глубины, примерно в диапазоне  $10^{-7}$  до  $10^{-8}$  м<sup>2</sup> с<sup>-1</sup>, что по-видимому соответствует объединено-закрытым эффектам увеличенного напряжения.

В Чиннор, ожидаемое увеличение скорости с увеличением глубины перекрывающей породы в меловых отложениях обнаружено, несмотря на уменьшение расстояния между неоднородностями при увеличении глубины (Хадсон и ал., 1980). Это, конечно, необычный тренд, и он дает неоспоримое свидетельство увеличения  $V_p$  с увеличением действующего напряжения, несмотря на уменьшение качества горной породы с увеличением глубины. Если бы больше глины присутствовало на участках, где неоднородности расположены ближе, увеличение скорости, связанное с эффектами трещин при увеличении напряжения были бы даже более явные.

Диаграмма скорость-глубина-пористость- $Q_c$ - $E_{mass}$ , показанная на рис. 6, создавалась более чем несколько лет методом проб и ошибок, и также объединяет данные, полученные на участках в более мягких горных породах, типа мела, меловом известняке, песчаниках, сланцах, и некоторых выдержанных вулканических, изверженных, и метаморфических горных породах, где были доступны сейсмические скорости и  $Q$ -значения, полученные с помощью каротажа. Эти более обширные данные были получены в проектах по туннелям и кавернам в Англии, Норвегии, Израиле, Гонконге, и Китае.

Жирная диагональная линия, непосредственно полученная из средних значений твердой породы, по данным малоглубинной сейсмике МПВ показаны на рис. 3, и частично основана на Sjogren и др. (1979).

Она имеет форму



$$V_p \approx 3.5 + \log Q_c \quad (4)$$

где единицы  $V_p$  - км с<sup>-1</sup>, и относится только к горным породам низкой пористости на глубине ~25 м., но теперь с переменной интенсивностью. Прямые линии выше жирной линии на рис. 6 указывают на соотношения качества со скоростью в горной породе, которые справедливы для большей глубины. Другие прямые линии ниже жирной линии дают приблизительную поправку для горных пород с более высокой пористостью, различия в скорости между этими линиями для более высокой пористости и жирной линией с постоянным значением  $Q_c$  - поправки, которые должны применяться для пористых горных пород на всех глубинах.

Для примера, твердая трещиноватая горная порода на глубине 500 м с  $V_p = 5.0$  км с<sup>-1</sup> должна была бы иметь  $Q_c = 1$ , если бы пористость была 1 %, в то время как для того же самого  $Q_c = 1$ ,  $V_p = 3.5$  км с<sup>-1</sup> ожидалась бы, если пористость фактически превышала бы 30 %. Значения для средней деформации массива пород, сведенные в таблицу справа на рис. 6 были получены из опыта, и показывают следующие эмпирические отношения (Бартон, 1995)

$$E_{mass} \approx 10Q_c^{1/3} \quad (5)$$

где единицы  $E_{mass}$  являются ГПа. Значения  $E_{mass}$  использовались для определения связей, которые были получены из теста выравнивания по вышележащему слою или туннельного и деформационного анализа. В последствии, тензометр буровой скважины для многократных измерений может использоваться для получения модулей, зависящих от глубины, в зоне, нарушенной в результате выработки, или может использоваться для простого измерения конвергенции и вычисления приблизительных оценок  $E_{mass}$ . Низкое значение  $E_{mass}$ (мин), также сведенные в таблицу, происходят из-за ослабления в зоне возмущения, которые традиционно окружают место теста и туннельные выработки из горной породы.

Если входные данные для  $Q$  (от поверхностного каротажа или глубинного каротажа) и одноосное растяжение  $Q_c$  (по испытанию в лаборатории), надежны, уравнение (5) может использоваться, для получения разумной оценки  $E_{mass}$ , которая является полезной для числового моделирования, где только ограниченное число разломов или трещин может дискретно моделироваться, используя их собственные жесткости. Дается направленная связь между скоростью и  $E_{mass}$ , чтобы обойти  $Q$ , несмотря на псевдостатическую природу  $E_{mass}$ . Глубинная зависимая оценка  $E_{mass}$  возможна, и желательна при моделировании.

Рис. 7, показывает объединенные геофизические параметры, со включением проницаемости. Как обозначено в нижнем масштабе рис. 7, предложены следующие предположительно обратные отношения:

$$L = 1/Q_c \quad (6)$$

где единицы  $L$  - Lugeons. Основные параметры для уравнения (6) даны в Бартон (2006). Центральная диагональная линия и эмпирические поправки для глубины и пористости на Рис. 7 - те же самые как на рис. 6. Простота и приблизительная природа уравнения (6) - строго для случая массива породы без глины.  $Q_c$  была приведена к форме  $QH2O$  Бартоном (2006) с инверсией  $Jr/Ja$  к  $Ja/Jr$  в формуле  $Q$ -отношения для учета глинистого уплотнения и шероховатости. Существует

также нормальный предел прочности при сжатии (JCS) (Бартон и Чуби, 1977), для грубой оценки скрытых эффектов напряжения вкост разломов или трещин.

'Тип кривых' для 'массивной', 'сильно трещиновой', и 'разломной' горной породы, показаны на рис. 7, с их предложенными трендами в поведении, и их, несомненно надо уточнять там, где имеются разломы. Важный аспект, полученный из туннельного опыта применения (Бартон, 2006) - это то, что описание зоны разломов, с помощью сейсмической томографии между парами искривленных стволов скважин, пробуренных до поверхности глубоких туннелей, могут дать вводящий в заблуждение вывод относительно высоких скоростей. Это, как предполагают, происходит из-за сильного уплотнения глины в пределах таких зон нарушений.

Зона нарушений с 'постоянной' скоростью столь же высокой, как 4 км с<sup>-1</sup> может, однако, вызвать большие трудности туннельного продвижения, с последующим разрушением или прихватом долота бурильного оборудования горизонтальной выработки (ТВМ), из-за сдвига и снятия давления по мере приближения к разлому, как если бы скорости в зоне нарушений была бы меньше, как в случае более близкого положения к поверхности. Здесь нужно также знать об 'аномальной' корреляции между окружающими туннель породами с низкими скоростями Р-волн 2-2.5 км с<sup>-1</sup>, измеренными в пористом (28%-ом) меловом известняке, как в большей части Тоннеля под Ла-Маншем между Англией и Францией. В отличие от этого, зона нарушений в трещинном, содержащем глину, и намного более низко-пористом граните, с той же самой измеренной скоростью 2-2.5 км с<sup>-1</sup>, при ее обнажении и снятии напряжения, может задержать тоннелирование в течение многих месяцев, что часто встречается в японских железнодорожных туннелях.

Скоростные изменения с глубиной для постоянных значений  $Q_c$  показаны в более знакомом виде на графике рис. 8. В реальной земной коре, значение  $Q_c$  увеличивается с глубиной из-за контраста между выветрелой и трещиноватой горной породой вблизи поверхности и более массивной неслоистой породой, обычно находящейся на глубине. В действительности происходит 'Q-скачок', который может быть постепенным или резким, как в терминах увеличения  $Q_c$ , так и увеличения  $Q_p$ . Особенно интересны примеры

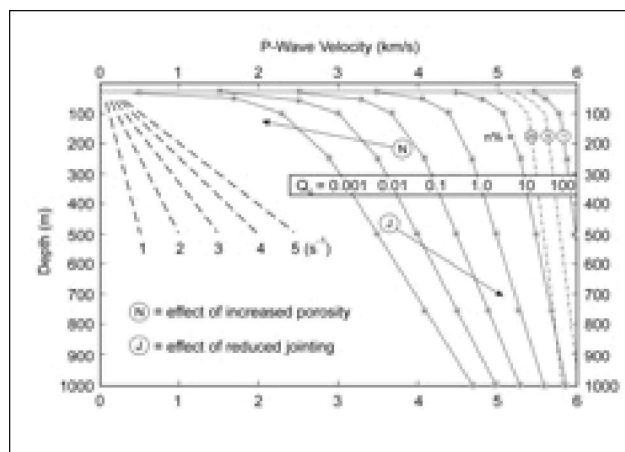


Рис 8 Вертикальные градиенты скорости в форме постоянных значений качества породного массива  $Q_c$ .

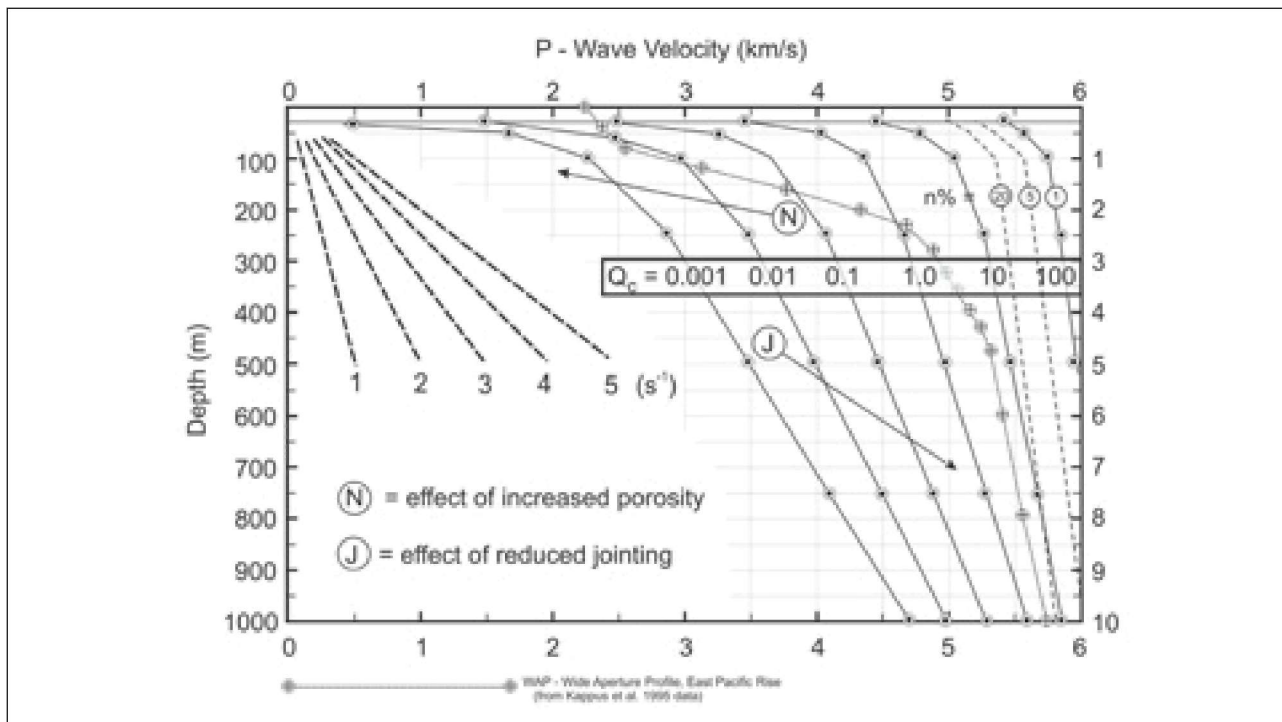


Рис 9 Реальный пример от Кэппус и др. (1995) суперпозиция графика скорость - глубина в базальтах Срединного океанического хребта. Изменение "около морского дна" дает увеличенную пористость, и гидротермальное запечатывание жидкости для древних базальтов стабилизирует качество на большей глубине. Принятый 'Q-скачок' для последовательно улучшенной горной породы объясняет дополнительный крутой вертикальный градиент скорости. (По Бартон, 2006).

в литературе по срединным океанским хребтам, где  $Q_c$  по-видимому увеличивается с глубиной и по существу в том же самом типе горной породы на основе измеренного увеличения скорости  $V_p$ , которое превосходит ожидаемое. Один пример от Кэппус и др. (1995) показан на рис. 9 и еще несколько рассмотрены Бартоном (2006).

### Связь между $Q_r$ и модулем деформации

Результаты широкомасштабных литературных исследований (Бартон 2006) говорят о том, что значение  $Q_r$  может использоваться для оценки числового значения коэффициента деформации массива пород  $E_{mass}$ , выраженного в единицах ГПа. Эта возможная замена показана на рисунке 10, и в следующей аппроксимации:

$$E_{mass} \approx Q_r \text{ (когда } E_{mass} \text{ в единицах ГПа)} \quad (7)$$

В скважине Varian на месторождении Parkfield в Калифорнии, которая вскрыла Третичные отложения на 1.5-километровой глубине, значения коэффициента  $K_n$  достигают 20, 30, и 55 по интервальному анализу на глубине 0-300 м, 300-940 м, и 570-940 м, по сообщению Abercrombie (2000) по скважинной регистрации землетрясений.  $Q_r$ , как отмечается, увеличивается до 110-170 на глубинах от 1 до 3 километров, эти значения  $K_n$  соответствуют вероятному распределению коэффициентам псевдостатической деформации, где последние выражены в ГПа. Такие связи могут быть установлены только интуитивно инженерами, и также подкрепляются отличительной схожестью  $Q_r$  с коэффициентами деформации, приведенными в многочисленных примерах физики горной породы, при вычерчивании в нелинейном масштабе  $Q_r$ , а не в перевернутом линейном масштабе  $1000/Q_r$

или  $Q_r -1$ , как функция действующего напряжения или рабочего давления (Бартон, 2006).

Фактически вклад рассеивания и собственно потерь при процессах как (микро-) разбрызгивание и (микро-) трение в величину  $Q_r$  конечно не выделяются в такой простой модели коэффициента, но поскольку оценки  $E_{mass}$  из уравнения  $Q_c$  (5) фактически включают размер блока, межблоковое трение, эффективное соотношение напряжения -к- растяжению, и эффекты водного давления, они в некотором роде производят выборку переменных от которого зависят оба типа затухания. Уменьшение плотности расположения трещин с глубиной, уменьшенным потери на трение, и рассеиванием на сокращенном числе трещин, освещаются (Abercrombie, 2000), для увеличения с глубиной  $Q_r$ . Это - все рецепты для увеличенного коэффициента деформации также, и согласуются с общим законом, который говорит о том, что измеренные или интерпретируемые значения  $E_{mass}$  в туннелях, вертикальных штольнях и шахтах увеличиваются с глубиной.

$Q_r$ , кажется, не коррелируется так же хорошо с динамическим коэффициентом  $E_{dyn}$  (рис. 2) как с псевдостатическими значениями  $E_{mass}$ , показанными на рис. 6. В принципе, увеличивающаяся скорость измерялась на глубине, как показано по нижней оси на рис. 10, и учитывает увеличивающийся модуль деформации с глубиной. Естественно, на глубинах в несколько километров, эмпирическая база простоты расчетов ломается, и  $Q_r$  может повыситься до величины 500, 1000, и даже 5000 на глубине. Крупный обзор  $Q_P$ ,  $Q_s$ , и  $Q_{coda}$  дается Бартоном (2006)

на основе физики горной породы, карьерных исследований, глубинных скважинных измерений, и анализа код землетрясений.

Перед проведением разработок пород, измерения  $V_p$  можно извлечь из данных МПВ, когда невозможно получить надежные данные по оценке качества массива пород. В этих условиях, объединяя уравнения (2), (3), и (5), исключая  $Q$ , вместе с уравнением (7), получаем

$$E_{mass} \approx Q_p \approx 10^{(vp-2.5+\log \sigma)/3} \quad (8)$$

где  $V_p$  выражен в единицах км с<sup>-1</sup>,  $E_{mass}$  в единицах ГПа и  $\sigma$  в единицах МПа. Это уравнение, или номограмма, показанная на рис. 10, может использоваться, чтобы оценить  $E_{mass}$  или  $Q_p$  и измеренную  $V_p$  и  $\sigma$  для массива пород в приповерхностном слое. Даже при том, что уравнения (3) и (5) были получены эмпирически и соответствуют главным образом приповерхностным данным, разумно применять уравнение (8) на рис. 10 для оценки в лучшем случае верхних 1 км насыщенной трещиноватой коры, вне которой эмпирическая база данных для измерений модулей резко снижается.

### Прикладной пример

Пример применения вышеприведенных отношений дается здесь для южноамериканской станции метро в граните и проиллюстрирован на рис. 11. Есть три типа трещин ( $J_n = 9$ ) и выветривание отмечено пятном коричневого цвета на многих плоскостях трещин. Многие имеют тонкие глинистые заполнения ( $J_a = 6$ ) и они являются плоскостными, но с маломасштабной грубостью ( $J_r = 1.5$ ).

RQD весьма высок в 90-100 % (некоторые части <10 см в длину). Есть немного воды (эта величина увеличивается при влажной погоде), и поэтому  $J_w = 0.6$ . Из-за малой глубины 10-20 м, SFR = 2.5. Скелет породы частично выветрелый, таким образом снижается предел прочности при сжатии ( $\sigma = 75$  МПа). Основная оценка качества массива пород делалась следующим образом, используя уравнения (1) и (2):

$$Q_c = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \times \frac{\sigma}{100} = \frac{90}{9} \times \frac{1.5}{6} \times \frac{0.6}{2.5} \times \frac{75}{100} = 0.5$$

Уравнение (4) дает  $V_p = 3.2$  км с<sup>-1</sup>. (Межскважинные скорости в диапазоне 3.0 к 3.5 км/с были типичными при переходе к более твердым породам на глубине 15-20 м в этом проекте).

Уравнение (5) дает  $E_{mass} = 7.9$  ГПа.

Уравнение (7) дает  $Q_p = 8$ .

Можно также отметить, что уравнение 6 предполагает  $L \approx 2$ , когда  $Q_c = 0.5$ , то есть, проницаемость  $2 \times 10^{-7}$  м × с<sup>-1</sup>. Цементация действительно требовалась на этом малоглубинном участке, из-за многочисленных проницаемостей подобной амплитуды. Заключительная стадия применения Q-системы, заключается в выборе опоры горной породы, которая должна выбираться для расстояния между пустотами 18 м, используя этот метод, был сделан выбор 14 см стального укрепленного стекловолокна торкрет-бетона, и систематическое сболчивание на расстоянии 1.6 м. Эти параметры получены при выборе опоры Q-системы (Бартон, 2002). На практике чрезвычайный запас прочности для станций метро заложен в эффективное расстояние между опорами (Термин SPAN/ESR), и используется дополнительная конечная облицовка из бетона.

На большей глубине, скажем 250 м, с отсутствием глины и выветривания, подобно-выглядящая масса пород показана на рисунке 11 и может дать  $Q_c = 15$ . Из рис. 6, мы можем увидеть предсказанное значение  $V_p = 5.5$  км с<sup>-1</sup> и  $E_{mass} = 46$  ГПа. Предложено  $Q_p = 46$  (или приблизительно 50). Согласно уравнению (6), проницаемость, возможно, уменьшается до  $10^{-8}$  м с<sup>-1</sup>, но более точная оценка могла бы быть получена, используя  $Q_{H2O}$ , с присутствием глины или без. (Бартон 2006).

### Заключение

Имеются большие градиенты во всех рассмотренных свойствах в приповерхностном переходе через сапролит, выветрелую трещинную горную породу, и в более массивной неслоистой породе. Здесь приводятся количественные отношения, связывающие скорость Р-волн  $V_p$ , качество массива пород  $Q_c$ , модуль деформации массива пород  $E_{mass}$ , сейсмическую добротность для Р-волн  $Q_p$ , и потенциально также проницаемость  $L$  (когда глина отсутствует), которые применяются для глубин до 1 км. Эти связи имеют важное применение при исследовании участка для проектирования во многих проектах, включающих выработки и изучение стабильности массива горной породы.

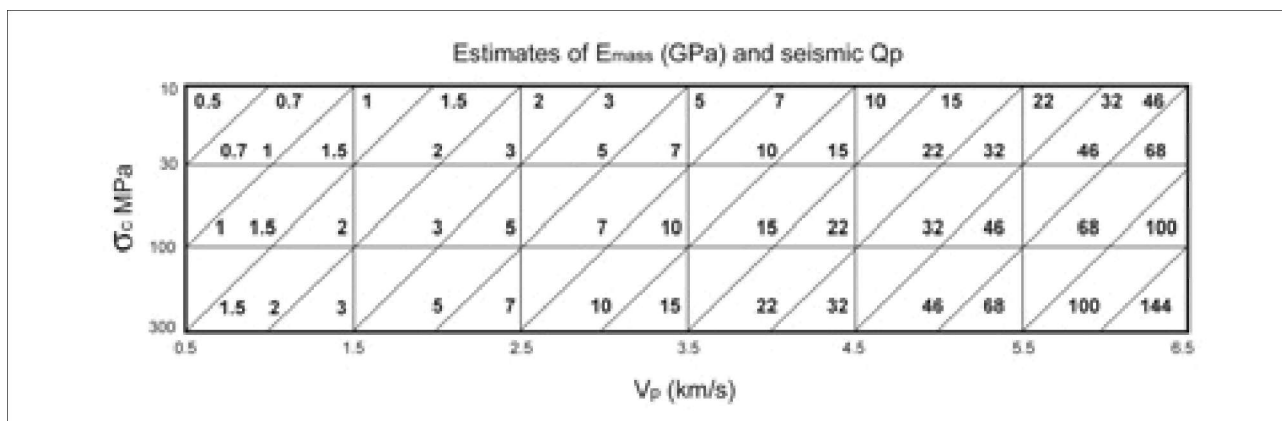


Рис 10 Номограмма, связывающая  $E_{mass}$  и  $V_p$  с одноосным растяжением  $\sigma$ . В первом 1 км трещинной горной породы,  $Q_p$  отличается замечательным числовым подобием с  $E_{mass}$  (с удаленными единицами ГПа). См. также уравнение 8.

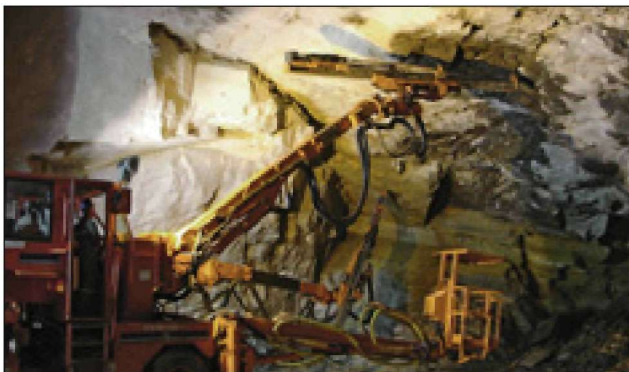


Рис 11 Разработка экскаватором на малой глубине трещиноватой породы для станции метро в Южной Америке.

## Благодарности

Автор хочет поблагодарить Редактора за очень полезные предложения для улучшения статьи.

## Ссылки

Abercrombie, R.E. [2000] Crustal attenuation and site effects at Parkfield, California. *Journal of Geophysical Research*, **105**, 6277-6286.

Barton, N., Lien, R. and Lunde, J. [1974] Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, **6**, 189-236.

Barton, N. and Choubey, V. [1977] The shear strength of rock

joints in theory and practice. *Rock Mechanics* 1/2, 1-54.

Barton, N., By, T.L., Chryssanthakis, P., Tunbridge, L., Kristiansen, J., Loset, F., Bhasin, R.K., Westerdahl, H., and Vik, G. [1994] Predicted and measured performance of the 62m span Norwegian Olympic ice hockey cavern at Gjøvik. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **31**, 617-641.

Barton, N. [1995] The influence of joint properties in modelling jointed rock masses. *Proc. 8th ISRM Congress, Tokyo*, **3**, 1023-1032. Balkema, Rotterdam.

Barton, N. [2002] Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **39**, 185-216.

Barton, N. [2006] *Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy*. Taylor & Francis, UK and The Netherlands, 729 pp.

Hudson, J.A., Jones, E.J.W., and New, B.M. [1980] P-wave velocity measurements in a machine-bored, chalk tunnel. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, **13**, 33-43.

Kappus, M.E., Harding, A.J., and Orcutt, J.A. [1995] A baseline for upper crustal velocity variations along the East Pacific Rise at 13°N. *Journal of Geophysical Research*, **100**, 6143-6161.

Sjogren, B. [1984] *Shallow Refraction Seismics*. Chapman and Hall, London.

Sjogren, B., Ofsthus, A., and Sandberg, J. [1979] Seismic classification of rock mass qualities. *Geophysical Prospecting*, **27**, 409-442.