

УДК 624.131.31:622.355

© В.В. Романов, И.И. Рахматуллин, С.А. Грохольская

*В.В. Романов, И.И. Рахматуллин, С.А. Грохольская*

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДЕЛИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВСКРЫШНЫХ ПОРОД КАРЬЕРА ПРИ ПОМОЩИ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

## Введение

Физико-механическими называются свойства горных пород, проявляющиеся под внешней механической нагрузкой. Среди них – плотность  $\rho$ , модуль полной деформации  $E_{\text{деф}}$ , угол внутреннего трения  $\varphi$ , удельное сцепление  $C$ , предел прочности на одноосное сжатие  $R$  и многие другие [7]. Знание физико-механических свойств (ФМС) горных пород имеет большое значение при разработке месторождений полезных ископаемых, разведочном и поисковом бурении, возведении зданий и сооружений и сейсмическом микрорайонировании. Достоверные данные о ФМС горных пород позволяют прогнозировать деформации и устойчивость обнажений массива, служат основанием для разработки эффективных методов разрушения пород при ведении горных работ, креплении выработок [8].

Традиционно для измерения ФМС применяются лабораторные измерения, условия которых далеки от того состояния, в котором горная порода находится в естественном залегании. Основной причиной отличия данных, полученных на образце горной породы от результатов исследования в массиве пород, является масштабный эффект. Это явление заключается в том, что физические свойства небольшого объема породы имеют завышенные значения физических свойств по сравнению с крупными геологическими телами. Причина масштабного эффекта в том, что вероятность встретить микродефект на уровне образца, обычно выбираемого достаточно прочным для лабораторных испытаний, намного меньше, чем в массиве горных пород.

С этой точки зрения при расчетах взаимодействия технических сооружений с пластами горных пород предпочтительней использовать интегральные показатели, а не результаты не связанных между собой точечных измерений. Для измерения интегральных ФМС горных пород применяются методы сейсморазведки, основанные на возбуждении и регистрации упругих волн. Скорости упругих волн зависят от плотности и упругих модулей пород, которые в свою очередь тесно связаны с прочими

физико-механическими свойствами. Указанная связь позволяет вывести эмпирические корреляционные уравнения для пересчета скоростей волн в ФМС горных пород. Например, известное в нефтегазовой геофизике уравнение Гарднера применяется для расчета плотности консолидированных горных пород по измеренной скорости продольной волны в отсутствие данных гамма-гамма плотностного каротажа [10]. Существуют и другие уравнения, содержащиеся в нормативных документах и рекомендуемые для определения физико-механических свойств пород по данным сейсморазведки [1, 7].

При разработке месторождений открытым способом горные породы вскрыши характеризуются уменьшенными значениями ФМС и нарушенной структурой. Механические свойства вскрышных пород, в частности угол внутреннего трения, определяют их устойчивость к оползанию и максимальный угол естественного откоса. Недоучет прочности вскрышного уступа может привести к обрушению или деформации бортов карьера [8].

В классификации инженерной геологии породы вскрыши относятся к связанным и несвязанным дисперсным грунтам с низкими прочностными свойствами. Слабые связи между частицами придают дисперсным грунтам рыхлую структуру с постепенным уплотнением породы по мере возрастания глубины [4]. В таких условиях измерения на одиночных образцах не могут дать полной и однозначной характеристики ФМС всего массива грунта.

Скорости упругих волн неразрывно связаны с физико-механическими параметрами грунтов в естественном залегании. Поэтому их значения также плавно возрастают с увеличением глубины и искривляют лучи рефрагированной сейсмической волны, вынуждая ее возвращаться на поверхность. Изучение зависимости времени прихода волны на сейсмические датчики от расстояния между источником и датчиком – годографа – позволяет найти подробное распределение скорости с глубиной. Следовательно, методы инженерной сейсморазведки могут применяться для оценки ФМС вскрышной

породы по всей ее мощности и точнее спроектировать конфигурацию отвалов.

Цель данной статьи – кратко осветить базовые аспекты выполнения сейсмических работ на вскрышных породах карьеров и проанализировать результаты, полученные на одном из карьеров Московской области.

#### Объект исследования

Для написания данной статьи применялся материал, полученный на одном из известняковых карьеров Подмосковья. В основании вскрытого карьером разреза находятся отложения подольского горизонта среднего карбона. Верхний вскрышной уступ состоит из юрских и четвертичных отложений. Юрские глины келовей-оксфордского возраста залегают лишь в южной части уступа, обнажаясь в северо-восточной части карьера. Четвертичные отложения представлены моренными суглинками и крупнообломочными песками днепровского и московского оледенений, перекрытыми покровными лессовидными суглинками верхнего плейстоцена (рис. 1) [9].

Максимальная мощность вскрыши достигает 10-15 метров в различных участках карьера. Подземные грунтовые воды накапливаются в кровле непроницаемых юрских глин и просачиваются вниз, разгружаясь в подошве карьера. Разработка

известняка и строительного песка в настоящее время ведется в ограниченном объеме, поэтому кровля большей части вскрышных пород затронута почвообразованием и имеет густой травяной покров. Из-за переувлажнения юрских глин в отвалах карьера интенсивно развиваются оползневые процессы, затрудняющие добычу известняка и приводящие к постепенному оползанию карьера [3]. Полное и детальное изучение ФМС вскрышной породы и ее отвалов позволит с минимальными затратами организовать защитные инженерные мероприятия по сохранению карьера.

#### Методика сейсморазведки

Для получения материала необходимого качества вдоль борта карьера прокладывался профиль сейсморазведочных работ. Вдоль него перемещалась расстановка из нескольких десятков сейсмических датчиков, расположенных на расстоянии 2 метра друг от друга. При помощи ударов тяжелого молота, наносимых по металлической подложке, расположенной на поверхности отвала, возбуждались поперечные волны. Так как поперечные волны связаны с касательными напряжениями, возникающими в горных породах, для их возбуждения удары совершались по вертикально ориентированной подложке, установленной в стенке небольшого шурфа [6].



Рис. 1. Отвалы карьера по добыче известняка и вскрышной уступ (помечены стрелками)

На получаемых сейсмограммах выделялись самые первые волны и строились их годографы. Характерная выпуклая форма годографов подтвердила увеличение скорости с глубиной, вызвавшее рефракцию лучей упругих сейсмических волн (рис. 2) [2].

Интерпретация годографов выполнялась по приближенному способу Кондратьева, наиболее простому в практическом исполнении и не налагающему каких либо ограничений на характер изменения скорости волн с глубиной. Результат такой интерпретации выражался в виде скоростной колонки – графика зависимости скорости от глубины максимального проникновения луча рефрагированной волны. Скоростная колонка разбивалась на градиентные слои с линейным возрастанием скорости (рис. 3).

Свойства градиентных слоев задаются при помощи двух величин – относительного градиента скорости  $\beta$  и скорости в кровле –  $V_0$ . Величина относительного градиента оценивается по угловому коэффициенту линейного участка скоростной колонки, нормированного на значение  $V_0$ :

$$\beta \left[ \frac{1}{\text{м}} \right] = \frac{1}{V_0} \frac{\Delta V}{\Delta z} . \quad (1)$$

Для практических расчетов удобно заменять распределение скорости в градиентном слое на единственное эффективное значение  $V_{\text{эфф}}$ . Эффективная скорость градиентного слоя вычисляется по известной мощности  $\Delta z$ , скорости в кровле  $V_0$  и относительному градиенту  $\beta$ :

$$V_{\text{эфф}} = \frac{V_0}{4} (1 + \beta \Delta z) . \quad (2)$$

Фактически использование выражения (2) «превращает» градиентный слой в однородный с заданной интегральной характеристикой  $V_{\text{эфф}}$ . Использование способа Кондратьева и расчетов по выражениям (1) и (2) позволило разбить толщу вскрышных пород на три градиентных слоя. Для каждого был найден относительный градиент  $\beta$  и эффективная скорость  $V_{\text{эфф}}$ , характеризующая градиентный слой как упруго-однородный.

### Полученные результаты

Переход от сейсмических упругих свойств к физико-механическим свойствам грунтов был осуществлен по уравнениям [1]. Например, угол внутреннего трения  $\varphi$  вскрышных пород рассчитывался по корреляционному выражению (3).

$$\varphi^\circ = 18,2 - 0,0357V_s \text{ (м/с)} . \quad (3)$$

Результаты обработки представлены в табл. 1.

В целом, наибольшие значения относительного градиента скорости характерны для первых трех-четырёх метров разреза. По значению градиента в толще пород вскрыши четко разделяются глинистые слои различного возраста и происхождения – покровные лессовидные суглинки валдайского оледенения (1-й слой), моренные суглинки и пески московско-днепровского оледенений и межледниковых

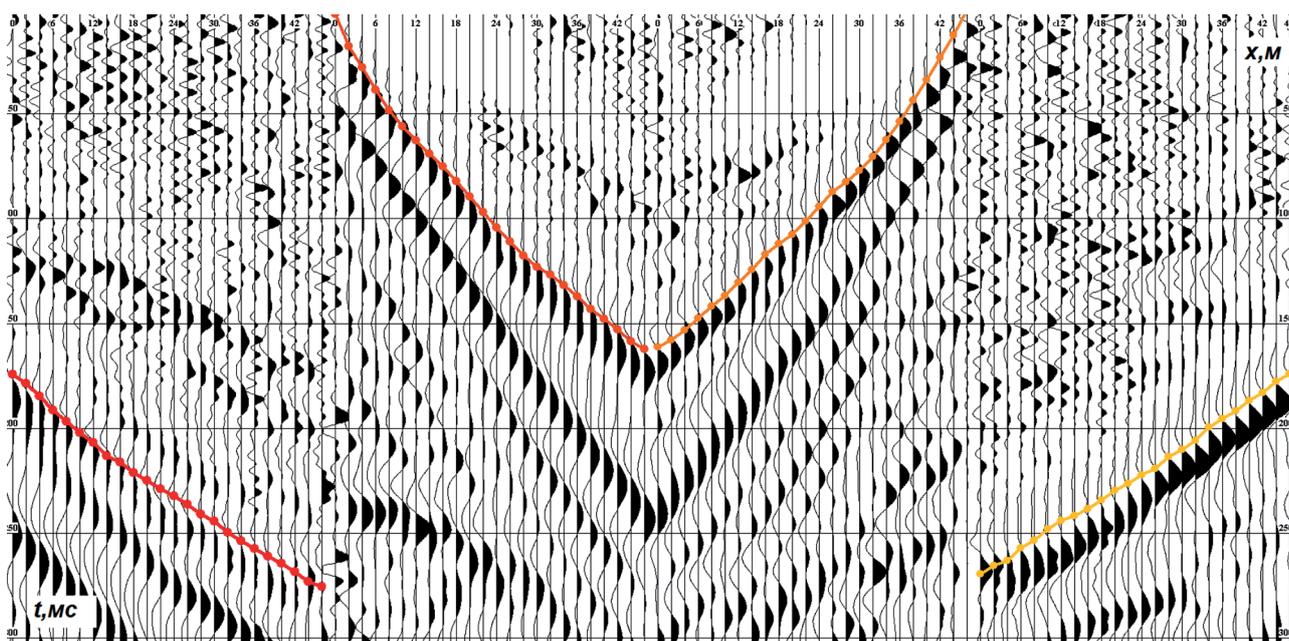


Рис. 2. Годографы первых волн на сейсмограммах, полученных при различном положении источника упругих волн. Прослеженные годографы характерны для рефрагированных волн

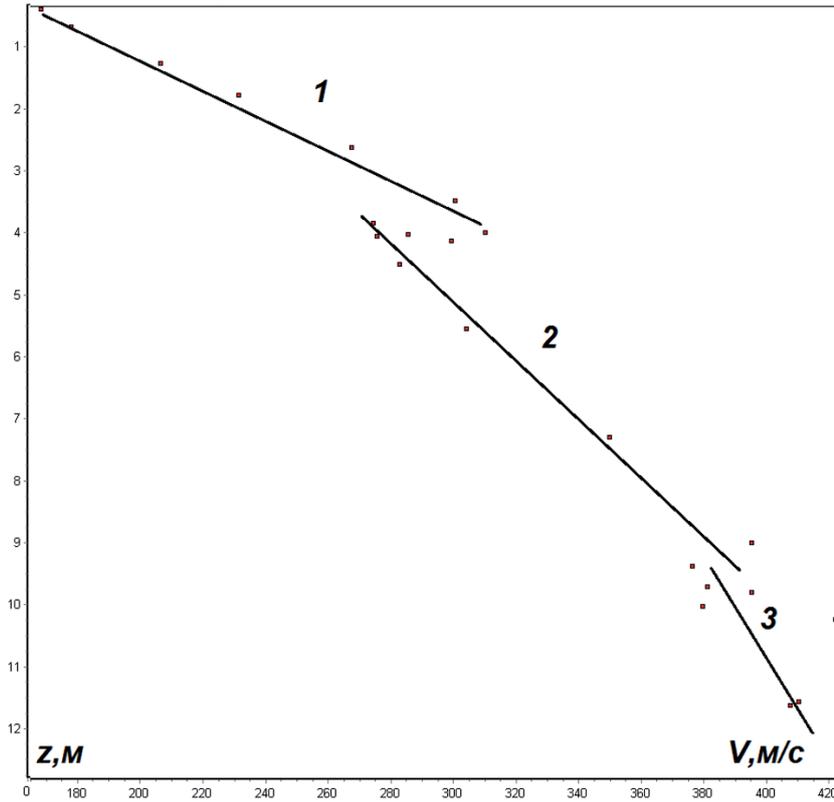


Рис. 3. Скоростная колонка, полученная при обработке данных метода рефрагированных волн

Таблица 1

Сводная таблица сейсмических и физико-механических свойств

Слой	$\Delta z$	$V_0$	$\Delta V$ , м/с	$\beta$ , 1/км	$V_{эфф}$ , м/с	$\varphi$ , °
1	3,5	160	160	290	240	21
2	6,0	260	120	80	320	15
3	3,5	380	40	30	400	9

периодов (2-й слой) и коренные юрские глины (3-й слой). Мощности выделенных сейморазведкой слоев примерно соответствуют геологическому разрезу толщи вскрышных пород. Наибольшим относительным градиентом скорости характеризуются покровные суглинки из-за их относительного небольшого возраста и макропористой структуры [5]. Далее по разрезу относительный градиент резко снижается и достигает наименьшего значения в основании вскрышной толщи.

Определенный по [1] угол внутреннего трения первого и второго слоя характерен для суглинков,

третьего – для глин, что косвенно подтверждает геологическую интерпретацию проведенной сейморазведки. Угол внутреннего трения, как и относительный градиент скорости, имеет тенденцию уменьшения с глубиной, что объясняется упрочнением структуры грунтов под влиянием литостатического давления.

**Выводы**

Накопленный опыт инженерно-геофизических изысканий подтверждает возможность определения нескольких десятков физико-механических

параметров горных пород по сейсморазведочным данным, однако практические примеры использования данной технологии в настоящее время крайне редки. Вместе с тем перспективы применения мало-глубинной инженерной сейсморазведки в горном деле весьма широки. Результаты, приведенные в статье, наглядно показывают, как от отвлеченных параметров физических полей перейти к механическим свойствам конкретных горных пород разрабатываемого месторождения. Пускай полученные данные требуют корректировки, порой весьма значительной, для увязки с лабораторными измерениями, однако накопленная статистическая информация позволит вывести индивидуальное корреляционное уравнение для отдельного карьера или региона. Помимо рассмотренного угла внутреннего трения, поле распределения скорости сейсмических волн может быть пересчитано в любой другой физико-механический параметр, для которого известна экспериментальная или нормативная зависимость.

**Ключевые слова:** физико-механические свойства, инженерная сейсморазведка, угол внутреннего трения, устойчивость отвалов карьера, преломленные волны, рефракция, упругие модули.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аникин О.П., Горшенин Ю.В. Методические рекомендации по определению состава, состояния и свойств грунтов сейсмоакустическими методами. – М. : ВНИИТС, 1985.
2. Белоусов А.В., Сергеев К.С., Сафиуллин Р.И. Возможности обработки различных типов волн, регистрируемых в инженерной сейсморазведке // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2014. – Т. 47. – № 1. – С. 86-93.
3. Володченко А.Н. Глинистые породы в производстве силикатного кирпича // Сборник научных трудов Sworld по материалам международной научно-практической конференции. – 2012. – Т. 26. – №. 2. – С. 8-10.
4. Кузьмин Ю.О., Жуков В.С. Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород. – М. : Изд-во Моск. гос. горного ун-та, 2004.
5. Романов В.В. Изучение толщи четвертичных отложений Подмосквья инженерной сейсморазведкой // Геофизика. – 2014. – № 3. – С. 41-48.
6. Романов В.В., Рахматуллин И.И. Инженерная геофизика при изучении гляциальных отложений Дмитровского района Подмосквья // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2014. – № 3. – С. 86-88.
7. СП 11-105-97. «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть VI. «Правила производства геофизических исследований» / Госстрой России. – М. : Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИИС) Госстроя России, 2004.
8. Сыркин П.С., Мартыненко И.А., Прокопов А.Ю. Шахтное и подземное строительство. – Новочеркасск : ЮРГТУ (НПИ), 2002.
9. Фекличев В.Г. Минералогическое разнообразие Подмосквья (к 850-летию г. Москвы) // Среди минералов (альманах). – М., 1998. – С. 103-112.
10. Gardner G., Gardner L. and Gregory A. Formation velocity and density – the diagnostic basics for stratigraphic traps // Geophysics. – 1974. – V. 39(6). – P. 770-780.