

Л. В. ЛИ¹

ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ИЗМЕНЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Стадияда тау жыныстарының физика-механикалық қасиеттерінің арасындағы байланыстары қарастырылады. Тау жыныстарының сейсмикалық қасиеттерінің өзгеруіне әсер ететін негізгі факторлары бұл жыныстың жер астында жату шарттары, сулануы, тау жыныстарының біртексіздігі, олардың заттық құрамы, құрылымдық байланыс сипаты мен фазалық құрамы, тау жыныстарының сейсмикалық қасиеттерінің катаю мөлшеріне байланыстылығы да анықталған.

Рассматривается связь между физико-механическими характеристиками горных пород (скоростями сейсмических волн, коэффициентом пустотности, плотностью сложения). Основные факторы, которые влияют на изменение сейсмических свойств горных пород, – это условия залегания, обводненность, неоднородность вещественного состава, характер структурных связей и фазового состояния горных пород. Также определена зависимость сейсмических свойств горных пород от величины напряжений.

This article concerns relation of physical and mechanical characteristics of rocks. Basic factors affecting seismic properties of rocks are as follows: subsurface conditions, water inundation, inhomogeneity, substantial and phase composition and type of structural coupling. Dependence of seismic attributes on tension is also determined in the article.

К сейсмическим свойствам горных пород относятся скорости распространения продольных V_p и

поперечных V_s волн, соответствующие коэффициенты (декременты) их поглощения $a_p(V_p)$ и $a_s(V_s)$ а также величины V_s/V_p и a_s/a_p . В случае, если порода обладает анизотропией (квазианизотропией) рассматриваемых свойств, вводят понятие коэффициента анизотропии α .

Скорости распространения сейсмических волн характеризуют упругие свойства горных пород, которые определяются линейным законом связи между напряжениями и деформациями – законом Гука. Коэффициенты (декременты) поглощения характеризуют неупругость пород, т.е. степень их отличия от идеально упругой модели, подчиняющейся закону Гука.

Эффективность сейсмических методов в инженерной геологии в конечном итоге зависит от того, насколько тесно сейсмические свойства пород связаны с рядом их объективных признаков, одновременно определяющих инженерно-геологические особенности объекта.

В приповерхностной зоне скальных пород и в покрывающих их рыхлых отложениях, которые в большинстве случаев являются основным объектом инженерно-геологических исследований, скорости прохождения сейсмических волн, как пра-

вило, различаются в 3–10 раз [3]. Если же скальные или полускальные породы выведены на дневную поверхность, то возрастание скоростей в глубину бывает обусловлено наличием поверхностной зоны выветривания, а также разгрузкой породы от естественных напряжений вблизи свободной поверхности. В пределах зоны поверхностного выветривания скорости всегда меньше, чем в неизменной среде, в 2–5 раз, причем скорость с глубиной может возрастать как плавно (глины, аргиллиты), так и ступенчато (известняки, песчаники и другие скальные и полускальные породы). На рис. 1 приведен годограф микросейсмокаротажа (МСК) скв. 118, пройденной в верхнемеловых известняках (Южный Торгай, участок Нуралы-Аксай). Скорость прохождения продольной волны в приповерхностной части, затронутой выветриванием, отличается от нижележащего слоя, не затронутого выветриванием, на 670 м/с. Отсюда следует, что при известной средней скорости для какой-либо неизменной породы и статистически установленной зависимости вариации этого параметра при нарушении сплошности толщи можно при сейсмических исследованиях по отклонению реальных скоростей

¹ Казахстан. 050010. г. Алматы, ул. Пушкина 86/46. ТОО «Петрорезервуар».

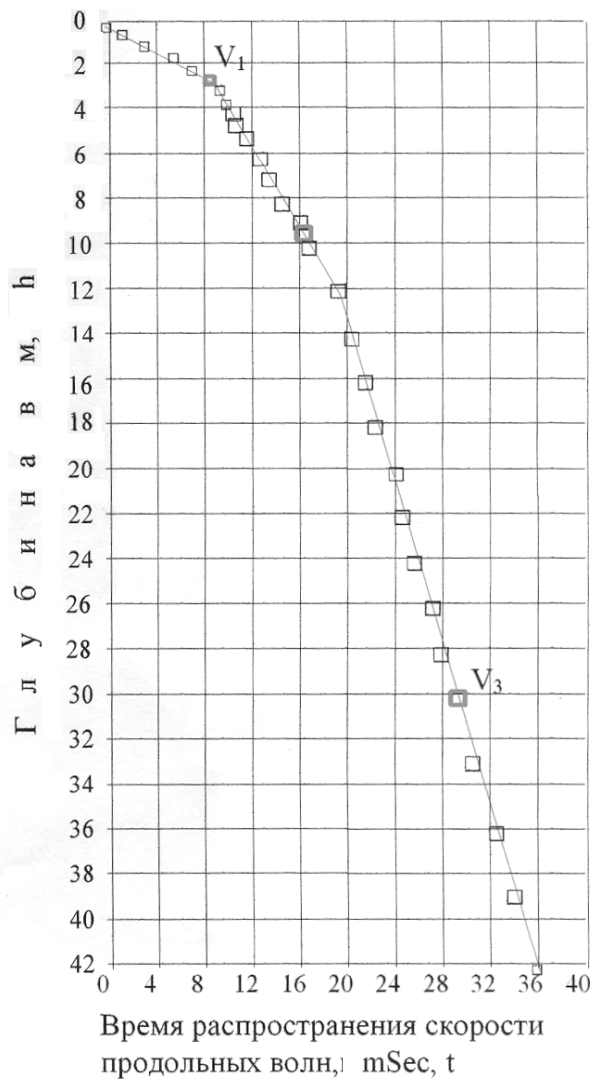


Рис. 1. Годограф микросейсмокартажа (МСК) по скв. 118 на участке Аксай-Нуралы (Южный Торгай).
 h – глубина, м, V – скорость, м/с: $h_1 = 2,56$ м,
 $V_1 = 271$ м/с; $h_2 = 9,44$ м, $V_2 = 1000$ м/с;
 $h_3 = 30$ м, $V_3 = 1674$ м/с

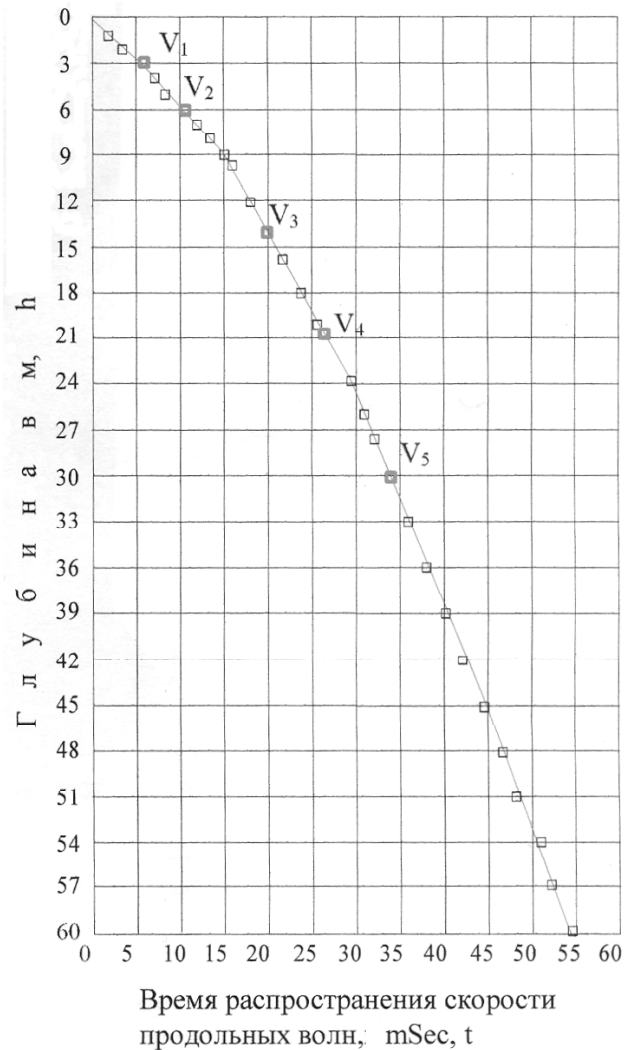


Рис. 2. Годограф микросейсмокартажа (МСК) по скважине № 25 на участке Арысский (Южный Торгай).
 h – глубина, м, V – скорость, м/с: $h_1 = 3,06$ м, $V_1 = 478$ м/с;
 $h_2 = 5,88$ м, $V_2 = 699$ м/с; $h_3 = 14,76$ м, $V_3 = 10,54$ м/с;
 $h_4 = 21,12$ м, $V_4 = 1287$ м/с; $h_5 = 31,88$ м, $V_5 = 1684$ м/с

от среднего оценивать степень выветривания, нарушенности и трещиноватости пород.

В рыхлых отложениях, даже однородных по составу, причиной возрастания скоростей в глубину является уплотнение материала под действием собственного веса: растет количество и жесткость межзерновых контактов в обломочных породах, что приводит к быстрому возрастанию упругости материала и соответственно увеличению скоростей распространения в нем упругих волн. Особенно заметно влияние глубины на ско-

рость волн в обломочно-суглинистых отложениях. Так, скорость продольных волн в оползневых образованиях такого состава при 250–500 м/с у дневной поверхности может достигать 1200–1500 м/с на глубинах 20–30 м. В однородных сухих толщах песка увеличение скорости в глубину происходит также достаточно заметно. На рис. 2 приведен годограф МСК по скв. 25 (Южный Торгай, участок Арысский), где видно, что в сухих эоловых песках скорость продольной волны с глубиной плавно увеличивается из-за уплотнения пес-

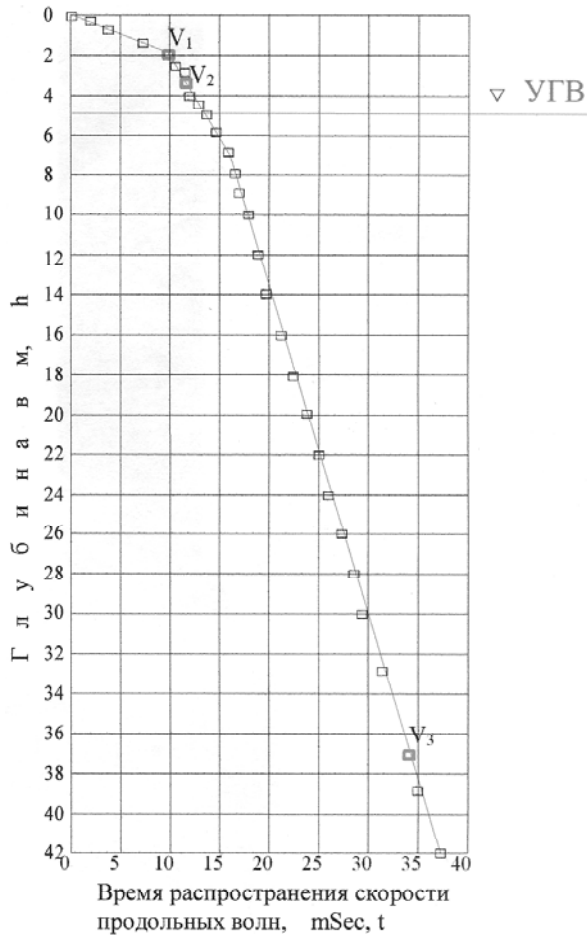


Рис. 3. Годограф микросейсмокаратажа (МСК) по скв. № 109 на участке Арысский (Южный Торгай).
 h – глубина, м, V – скорость, м/с: $h_1 = 1,92$ м, $V_1 = 213$ м/с;
 $h_2 = 3,04$ м, $V_2 = 763$ м/с; $h_3 = 37,04$ м, $V_3 = 1637$ м/с

чаного массива под действием собственного веса.

В свежих обнажениях естественного или искусственного происхождения также практически всегда наблюдается увеличение скорости от свободной поверхности в глубину массива. В этом случае причиной увеличения скорости является разгрузка породы от естественных напряжений и, как следствие, ее разуплотнение. Разуплотненные части массива, прилегающие к свободной поверхности, иногда являются следствием разработки породы механизмами или взрывным способом.

В рыхлых породах большое влияние на величину скорости распространения оказывает их обводненность. Причем, в рыхлых несвязных отложениях (песок, гравий, галечник, обломочные грунты и их смеси) скорость, оставаясь примерно постоянной в широком диапазоне влажно-

сти, резко возрастает при достижении полного водонасыщения. На годографе МСК скв. 109 (рис. 3) границей разных скоростей в гравийно-галечных отложениях Арысской впадины служит уровень грунтовых вод (Южный Торгай, участок Арысский).

В глинах и глинистых отложениях скорость продольных волн, напротив, чутко реагирует на изменение влажности, существенно меняя свою величину в соответствии с колебаниями характеристики последней. В суглинистых и глинистых породах над зеркалом грунтовых вод существует капиллярная кайма, поэтому сопоставление глубин залегания уровня грунтовых вод (УГВ) в суглинках, определенных сейсморазведкой и бурением, обнаружило систематическое различие данных этих двух методов. Сейсмическая граница всегда оказывалась на 2-3 м выше уровня воды, установившегося в скважине через несколько дней после бурения.

Таким образом, увеличение влажности суглинистых и глинистых грунтов приводит к росту в них скорости продольных волн и, как следствие, к снижению резкости сейсмической границы, соответствующей уровню грунтовых вод. Наличием капиллярной каймы обусловлено появление переходной зоны от влажных к водонасыщенным породам и опять-таки к снижению резкости сейсмической границы. На рис. 4 изображены разрез по данным бурения, эпюра продольной и поперечной волны и их соотношение в континентальных ниже-среднеплиоценовых отложениях, развитых в Торгайской впадине (скв. №38). Хорошо видно, что при достижении уровня грунтовых вод скорость продольной волны резко возрастает, а скорость поперечной волны остается неизменной.

Сейсмические свойства горных пород в определенной степени зависят также от минерализации и химического состава воды или льда, содержащихся в порах (трещинах) [1]. При этом с увеличением минерализации воды, V_p возрастает, а с ростом содержания солей во льду V_p и V_s уменьшаются. Кроме того, сейсмические свойства горных пород, содержащих лед, зависят от температуры, поскольку ее изменение заметно влияет на сейсмические свойства льда. Оценить характер изменения скоростей волн за счет изменения минерализации воды, а также состава и температуры льда можно с помощью ряда рас-

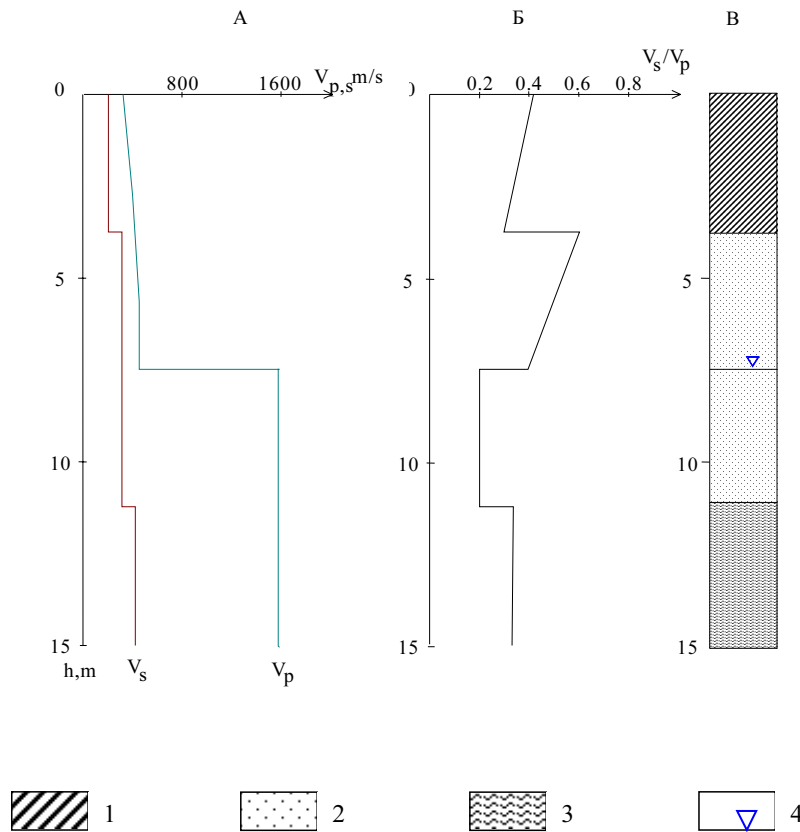


Рис. 4. Годограф микросейсмокартажа (МСК) по скв. № 38 на участке Арыский (Южный Торгай).
 А, Б – геосейсмические разрезы; В – литологический разрез по данным бурения; 1 – суглинки,
 2 – пески, 3 – глины, 4 – уровень грунтовых вод

четных формул, представленных в работах [1–3].

Сейсмические свойства пород зависят от их вещественного состава. При прочих равных условиях для магматических скальных пород наблюдается тенденция увеличения V_p и V_s при переходе от кислых пород к основным, а для метаморфических – при переходе от низких фаций метаморфизма к более высоким. Среди осадочных горных пород более низкие значения скорости наблюдаются в терригенных, а более высокие – в карбонатных породах.

В монтмориллонитовых глинах V_p больше, чем в гидрослюдистых и особенно в каолиновых глинах той же пористости и влажности. Это, по-видимому, объясняется тем, что монтмориллонит способен связывать большее количество воды. Таким образом, вещественный состав горных пород оказывает определенное влияние на их сейсмические свойства, однако другие факторы и, в первую очередь, характер структурных связей и фазовый состав пород, влияют значительно.

Сейсмические свойства горных пород существенным образом зависят от характера структурных связей слагающих его частиц. Этим объясняются значительные различия сейсмических свойств трех типов пород: скальных, обладающих жесткими связями, крупнообломочных и песчаных, в которых связи отсутствуют, и глинистых, в которых преобладают водно-коллоидные связи.

В скальных породах (при условии их сохранности) наблюдаются наиболее высокие значения V_p , V_s и наиболее низкие величины a_p , a_s , а в крупнообломочных и песчаных наоборот. Для глинистых отложений характерны относительно высокие V_p , a_p , a_s и низкие V_s (см. табл. 1).

При разрушении структурных связей сейсмические свойства пород значительно изменяются. Характер структурных связей оказывает чрезвычайно сильное влияние на сейсмические свойства пород. Вследствие этого рассмотрение свойств целесообразно проводить отдельно для пород с различным типом структурных связей.

Сейсмические свойства пород различных типов в неводонасыщенном состоянии в зоне малых скоростей (ЗМС)

Породы	V_p , м/с	V_s , м/с	V_s/V_p	a_p , м ⁻¹	a_s , м ⁻¹
Скальные слаботрещи-новатые (граниты, пес-чаники, известняки)	3500-5000	2000-3000	0,5-0,6	0,01-0,06	0,01-0,08
Крупнообломочные и песчаные (галечники, гравий, песок)	200-800	150-500	0,5-0,7	0,10-0,18	0,13-0,18
Глинистые (суглинки, глины)	300-1800	100-400	0,1-0,5	0,08-0,19	0,10-0,21

Изучение архивных и фондовых материалов, многочисленных экспериментальные данные показали, что сейсмические свойства горных пород существенно зависят от соотношения в них твердой, жидкой и газообразной фаз.

Сейсмические свойства скальных пород тесно связаны с их пористостью и трещиноватостью, а также с характером заполнителя пустот. Существуют теоретические решения, позволяющие оценивать влияние пустотности скальных пород на их сейсмические свойства. Наиболее просто такая оценка может быть проведена с помощью формулы «среднего времени»:

$$\frac{1}{V_p} = \frac{K_n}{V_{p3}} + \frac{1-K_n}{V_{pm}}, \quad (1)$$

где V_p , V_{p3} и V_{pm} – скорости продольных волн соответственно в пористой трещиноватой породе, заполнителя пустот и минеральном скелете (в твердой фазе породы); K_n – коэффициент пустотности, равный отношению объема всех пустот к общему объему породы.

С увеличением пустотности породы, скорость продольных волн падает, в пределе приближаясь к соответствующему значению в заполнителе пустот. В верхней части разреза, как правило, скальные породы представлены выветрелым или полуразрушенным материалом и на сейсмические характеристики материнской породы в верхнем интервале оказывает огромное влияние заполнитель, который представлен крупнообломочными, песчаными и глинистыми породами. Сейсмические свойства крупнообломочных, песчаных и глинистых пород полностью зависят от их фазового состава.

Крупнообломочные и песчаные породы. Скорость продольных волн в двухфазных дискретных средах, состоящих из твердых частиц и жидкого или газового заполнителя, при отсутствии внешнего давления составляет:

$$V_p = \frac{V_{pm}}{(1-K_n) \sqrt{\left[1 + \frac{K_n}{1-K_n} \cdot \frac{\rho_m}{\rho_3} \cdot \left(\frac{V_{pm}}{V_{p3}}\right) \cdot \left(\frac{V_{pm}}{V_{p3}}\right)\right] \cdot \left(1 + \frac{K_n}{1-K_n} \cdot \frac{\rho_3}{\rho_m}\right)}}, \quad (2)$$

где V_p – скорость продольных волн, K_n – коэффициент пустотности, V_{pm} , V_{p3} – скорости продольных волн в материале твердой фазы и заполнителя, ρ_m , ρ_3 – плотности материала твердой фазы и заполнителя [2, с. 14].

Величина V_s в отличие от V_p практически не изменяется при переходе обломочно-песчаных пород из воздушно-сухого состояния в водонасыщенное, но сильно возрастает, если заполнителем пор является лед. Существенно изменяется и отношение V_s/V_p , так при $K_n=0,2$ ÷ $0,5$ для случая заполнения пор воздухом $V_s/V_p=0,6$ ÷ $0,7$, водой – $V_s/V_p=0,1$ ÷ $0,2$, льдом – $V_s/V_p=0,5$ ÷ $0,6$.

О характере изменения величины V_p при изменении пористости в случае полного заполнения пор водой или льдом можно сказать, что с увеличением пористости величина V_p как в первом, так и во втором случаях в целом уменьшается, стремясь к соответствующему значению V_p в воде и во льду. Однако при заполнении пор водой существует минимум V_p , соответствующий пористости около 80 %, после чего значение V_p с ростом пористости начинает несколько возрастать. Скорость продольных волн в среде, заполненной льдом, теоретически выше, чем в чистом льду.

Для пород, находящихся в воздушно-сухом состоянии, отмечается еще более тесная связь V_p с K_n . Так, по результатам опытов, проведенных в Южном Торгае, по данным МСК 42 скважин, изменение K_n от 43 до 37% в сухом кварцевом песке при отсутствии давления приводит в увеличению V_p от 270 до 320 м/с.

Зависимость V_s от пористости обломочно-песчаных пород при различных типах заполнителей исследована недостаточно. Немногочисленные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при заполнении пор водой или льдом V_s уменьшается с увеличением K_n несколько

быстрее, чем V_p . Для воздушно-сухого состояния наблюдается обратная картина.

Глинистые породы. В глинистых породах переход от воздушно-сухого состояния в водонасыщенное и затем в полностью влагонасыщенное при отрицательной температуре в целом сопровождается менее резким изменением сейсмических свойств, чем это наблюдается в обломочно-песчаных породах. Скорость поперечных волн в глинистых породах в водонасыщенном состоянии обычно ниже, чем в воздушно-сухом при той же пористости, что связано с уменьшением при водонасыщении прочности структурных связей. В полностью влагонасыщенных мерзлых глинах величина V_s заметно ниже, чем при тех же условиях в обломочно-песчаных породах. В соответствии с изменением V_s и V_p при переходе глинистых пород из одного состояния в другое меняется и отношение V_s / V_p . Так, для глинистых пород в воздушно-сухом состоянии величина V_s / V_p достигает 0,5–0,6, при полном заполнении пор водой она равна 0,1–0,2, в случае полного влагонасыщения при небольшой отрицательной температуре $V_s / V_p = 0,4–0,5$.

В водонасыщенных глинистых породах с увеличением пористости скорость продольных волн уменьшается примерно так же, как и в обломочно-песчаных породах.

Как теоретические, так и экспериментальные данные свидетельствуют о том, что сейсмические свойства горных пород существенно зависят от величины напряжений, возникающих в горных породах под воздействием внешних сил (главным образом, силы тяжести). Экспериментальная проверка теоретических положений сводится обычно к измерению скоростей волн в образцах при увеличивающемся давлении. Результаты таких опытов качественно согласуются с теорией, однако в количественном отношении между теоретическими и экспериментальными данными нередко обнаруживаются расхождения. Так, выполненные по такой методике опыты с сухим песком (участок Арысский) показали, что с ростом давления скорости волн увеличиваются значительно быстрее по сравнению с теоретическими результатами. Более быстрое возрастание V_p с глубиной наблюдается также в естественных условиях при изучении мощных толщ неводонасыщенных песчаных пород. Это объясняется тем, что рост давления на образцах приводил к одновременному уменьшению их пористости, а в естественных условиях кроме уменьшения пористости с глубиной обычно увеличивается

прочность структурных связей. В естественных условиях напряжения могут изменяться не только по глубине, но и по площади.

Возможность оценки различного рода инженерно-геологических характеристик пород с помощью сейсмических методов базируется на взаимосвязи и взаимозависимости большинства инженерно-геологических характеристик с сейсмическими. В общем случае конкретные значения тех или иных характеристик являются функциями состояния породы. Под состоянием породы понимается ее выветрелость, пористость, трещиноватость, величина действующих в массиве напряжений, влажность или обводненность, а также состав и количество заполнителя пор и трещин. У рыхлых пород основные факторы, определяющие состояние, – степень их уплотнения и влажность.

Перечисленные факторы, определяющие состояние породы, имеют тесные связи с сейсмическими параметрами и инженерно-геологическими свойствами породы, включающими плотность, модуль упругости, модуль деформации, коэффициент Пуассона, предел прочности на сжатие, сцепление. Изменение какого-либо показателя состояния породы ведет к изменению сейсмических и инженерно-геологических показателей породы. Можно утверждать, что для типа породы, характеризующейся постоянным минеральным составом, типом и качеством цемента, каждому конкретному состоянию соответствует свой, совершенно определенный ряд значений инженерно-геологических характеристик и сейсмических параметров.

Так как все характеристики, описывающие свойства породы и сейсмические параметры распространяющихся в массиве упругих волн, взаимозависимы, должна существовать корреляционная связь между любыми характеристиками, при которой по значению одной (легче поддающейся измерению) можно оценить численное значение другой, непосредственные измерения которой в условиях естественного залегания горных пород сопряжены с большими трудностями или материальными затратами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никитин В.Н. Основы инженерной сейсмологии. М.: МГУ, 1981. 176 с.
2. Горяинов Н.Н., Ляховицкий Ф.М. Сейсмические методы в инженерной геологии. М.: Недра, 1979. 143 с.
3. Закрякин В.К. Курс петрофизики для инженеров. Алматы, 2003. 187 с.