

Л. В. ЛИ¹

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРНЫХ ПОРОД

Инженерлік-геологиялық мақсаттар үшін жиналған тәжірибе негізінде сейсмикалық параметрлер мен инженерлік-геологиялық өзгешеліктерінің өзара байланысы аныкталды.

На основании накопленного опыта сейсморазведочных работ в инженерно-геологических целях была определена взаимосвязь между сейсмическими параметрами и инженерно-геологическими характеристиками. Описана зависимость между скоростями продольных и поперечных волн и упругими свойствами.

As a result of accumulated experience in carrying out seismic survey operations for engineering-geological purposes there was determined the relationship between seismic parameters and engineering-geological characteristics. The article describes the relationship between compressional (P-waves) and shear (S-waves) velocity and elastic rock properties.

Имеющийся опыт свидетельствует о высокой эффективности применения сейсморазведочных методов при самых различных видах гидро-геологических и инженерно-геологических исследований. Успехи таких методов применительно к разнообразным задачам инженерной геологии обусловлены следующими геологическими предпосылками:

1. Неоднородность горных пород в верхней части разреза в отношении упругих свойств. Это обуславливает возможность регистрации отраженных, преломленных и рефрагированных волн, связанных с данными неоднородностями, и позволяет использовать сейсморазведку для пространственного выделения неоднородностей, отображающих особенности геологического строения среды.

2. Наличие связи между сейсмическими характеристиками горных пород и их составом, это позволяет использовать сейсморазведку для литологической привязки выделенных неоднородностей.

3. Наличие связи между сейсмическими характеристиками горных пород, с одной стороны, и их состоянием и физико-механическими показателями – с другой; это позволяет использовать сейсморазведку для оценки состояния и физико-механических показателей горных пород в их естественном залегании.

В инженерной практике часто возникает необходимость знания упругих или деформационных характеристик, описывающих поведение горных пород под воздействием какой-либо нагрузки.

ки, а также при прохождении естественных или искусственных колебаний (вибрации от работы механизмов, сейсмические волны землетрясений и т.п.). Геофизическими методами (а именно сейсморазведки) можно с наименьшими затратами времени и средств определить основные инженерно-геологические показатели: плотность, пористость, упругие, прочностные и другие характеристики [2].

На ранних стадиях исследований (среднемасштабные съемки) обычно бывает достаточно дать сравнительную характеристику отдельных участков исследуемой территории по величине того или иного инженерно-геологического показателя. На поздних стадиях инженерно-строительных изысканий задача заключается в определении с необходимой детальностью и точностью расчетных показателей физико-механических свойств пород.

В общем случае задача определения некоторых физико-механических показателей (в этой работе речь идет об упругих показателях) была решена в три этапа:

1) были установлены расчетные соотношения между сейсмическими (V_p и V_s скорости распространения продольных и поперечных волн соответственно) и упругими (E – модуль упругости, μ – коэффициент Пуассона) характеристиками пород;

2) с необходимой детальностью были определены сейсмические характеристики изучаемого массива;

¹Казахстан. 050079, г. Алматы, м-он. Алтай-1, 18/33, ТОО «Инжениринг сервис».

3) с помощью ранее установленных расчетных соотношений были определены физико-механические свойства пород.

Задача определения инженерно-геологических упругих показателей посредством сейсмических характеристик решается путем отыскания корреляционных соотношений между искомым показателем и скоростями распространения сейсмических волн в данной горной породе [3]. Этот способ, как видно из его сути, носит название прямой корреляции и заключается в сопоставлении величин динамического модуля упругости и коэффициента Пуассона, определенных лабораторно и скоростями распространения сейсмических волн. С этой целью были проведены совместные определения модуля динамической упругости (Юнга) и коэффициента Пуассона методами инженерной геологии (в лаборатории) и скоростей методом сейсморазведки. Безусловно, при определении этих значений необходимо было соблюдение обязательного условия: каждой паре значений E и V_p , E и V_s , μ и V_p , μ и V_s соответствует конкретный интервал литологической разности, т.е. точки опробования и точки опытных работ МСК должны совпадать. Эти работы проводились на территории Торгайской впадины.

В 2004 г. по всей территории листа L-41-XVIII проводилось инженерно-геологическое обследование, помимо основного комплекса инженерно-геологических исследований в состав работ входили бурение скважин глубиной до 10 м, опробование через каждые 2 м проходки и опытные работы методом микросейсмокаратаха (МСК). На каждом интервале, где отбирались пробы на определение физико-механических характеристик, в том числе упругих, возбуждались колебания и трехкомпонентным сейсмоприемником принимались скорости распространения продольных и поперечных волн. Определение упругих характеристик проводилось для связанных грунтов. Таким образом, мы получили несколько пар значений, по которым можем построить графики зависимостей $E=f(V_p)$, $E=f(V_s)$, $\mu=f(V_s/V_p)$, по которым легко определяется уравнение корреляционной связи. Коэффициент Пуассона находится из соотношения скоростей [4]. Графики корреляционной зависимости упругих и сейсмических характеристик приведены на рис. 1 и 2. Данные расчетов по выявленным зависимостям показаны в табл. 1 и 2.

Для построения графика связи модуля динамической упругости и сейсмических характеристи-

стик была использована логарифмическая зависимость, уравнение связи имеет вид

$$E = \ln(V_s, V_p) + b.$$

При этом наблюдается достаточно высокий уровень корреляции. Среднеквадратичное отклонение в массиве лабораторных данных составляет $\pm 1194,6 (\cdot 10^5 \text{ Па})$ при коэффициенте вариации 54,6%. При вычислении модуля динамической упругости с использованием скорости продольных волн среднеквадратичное отклонение от истинного значения составляет $\pm 800,5 (\cdot 10^5 \text{ Па})$, а коэффициент вариации равен 36,6%, при использовании скорости поперечных волн среднеквадратичное отклонение от истинного значения $\pm 782,1 (\cdot 10^5 \text{ Па})$, при изменчивости показаний 35,7% (табл. 1). Это говорит о высокой сходимости значений, полученных лабораторным и расчетным методами: сходимость результатов, полученных посредством $V_s - 76\%$, $V_p - 74\%$. Опытные данные сейсморазведки и данные лабораторных исследований имеют коэффициент корреляции 0,79 по V_s и 0,78 по V_p .

При использовании выведенной зависимости получены результаты модуля динамической упругости, которые коррелируются с опытными данными сейсморазведки с коэффициентом 0,99 при допустимой погрешности (табл. 1). Также были проведены расчеты модуля динамической упругости по формуле, выведенной из закона Гука [1] (графа 9, табл. 1). Отношение рассчитанных значений к истинным равно 0,61. В состав формулы входят четыре параметра (модуль динамической упругости, плотность, скорости поперечных и продольных волн). Их взаимосвязь друг с другом очевидна, с каждым в отдельности она объяснима, но использование всех четырех параметров позволяет определять модуль динамической упругости в приближенном значении. Возможно, это связано с аридностью климатических условий территории, хотя данная формула использована многими исследователями и в большинстве случаев показатели, входящие в нее, давали достаточно высокий коэффициент корреляции (0,689), а статистические данные показывали ошибку не более 25%, (ее не использовали для площадей, аналогичных Торгайской впадине), для грунтов верхней части разреза Южного Торгая ее использовать не рекомендуется. Коэффициент корреляции при применении предложенной формулы не превышает 51 %.

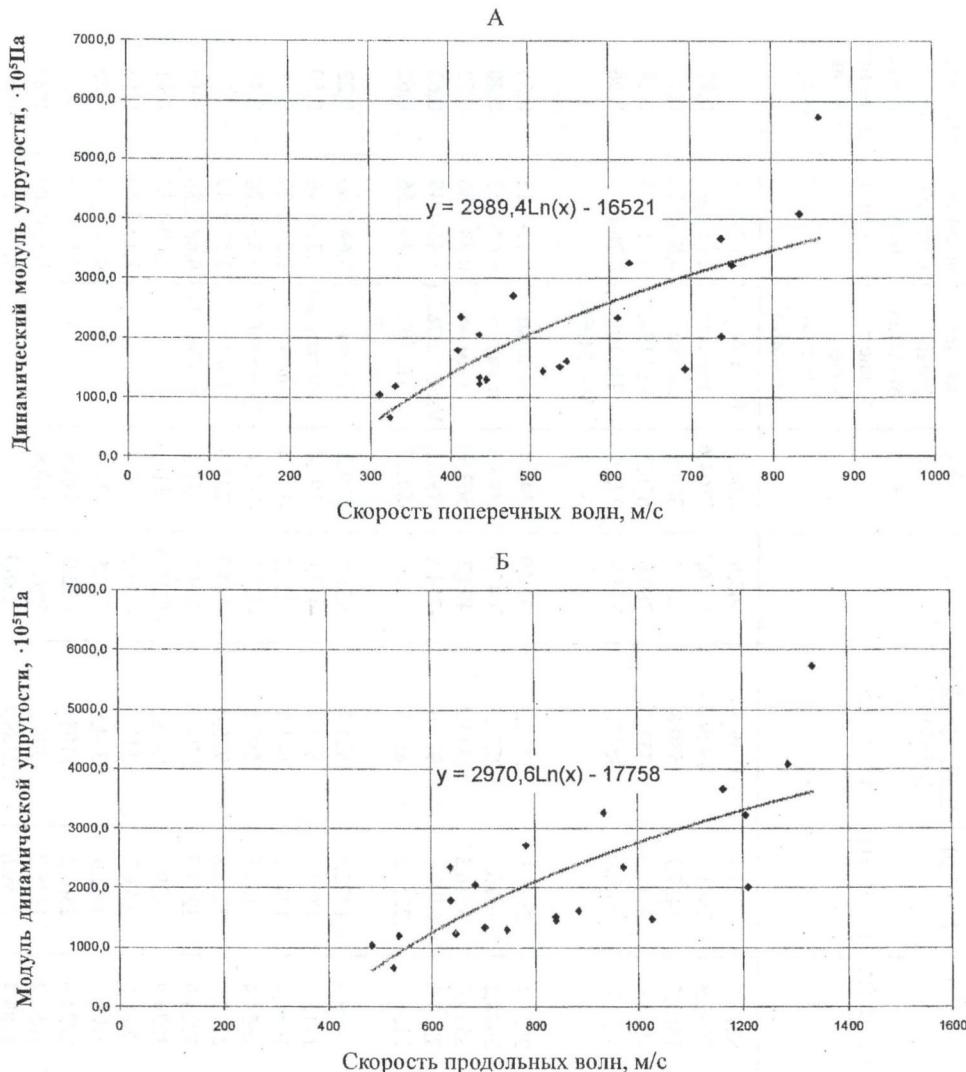


Рис.1. Корреляционная связь между модулем динамической упругости и скоростями сейсмических волн:
А – поперечных, Б – продольных



Рис.2. Корреляционная связь между коэффициентом Пуассона и скоростями сейсмических волн

Таблица 1. Результаты определения динамического модуля упругости глинистых отложений из корреляционных связей $E = f(V_p)$ $E = f(V_s)$

Уравнения связей $E_d = 2995 \ln(V_p) - 17916$ и $E_d = 3002,4 \ln(V_s) - 16599$

№	Интервал опробования скважины	Лабораторное определение δ , г/см ³	По данным МСК		Рассчитанное $E = f(V_s)$	Рассчитанное $E = f(V_p)$	$\frac{\Delta V_s^4 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{2(V_p^2 - V_s^2)}$	Рассчитанное $\frac{\Delta V_s^4 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{2(V_p^2 - V_s^2)}$		Ошибки по V_s	Ошибки по V_p	Среднеквадратичное отклонение $\sigma_{V_s-V_p}$	Отношение рассчитанного значения к истинному V_s-V_p	Отношение рассчитанного значения к истинному V_s-V_p	
			V_s , м/c	V_p , м/c				$E_s \cdot 10^3$ Па	$E_p \cdot 10^3$ Па						
13-4	3,8-4,2	2,75	752	1207	3216,4	3277,0	3321,1	1839,40	-60,6	-104,7	-1556,1	-1364,6	1,02-1,03	0,57	
32-7+8	9,8-10,1	2,75	693	1027	1476,7	3032,8	2841,3	1429,0	-1556,1	-1364,6	2045,9	2103,6	2,05-1,92	0,97	
21-6	7,0-7,3	2,75	410	638	1787,9	1463,7	1427,1	530,8	324,2	360,8	490,2	563,9	0,82-0,80	0,30	
25-5	4,1-4,2	2,74	480	784	2715,5	1934,9	2039,3	757,7	780,6	676,2	714,8	794,1	0,71-0,75	0,28	
28-4	3,0-3,3	2,68	332	537	1188,8	832,9	915,2	3517,1	355,9	273,6	Pa.10 ⁵ ;	Pa.10 ⁵ ;	0,70-0,77	2,96	
											$V = 54,6\%$				
28-5	6,0-6,2	2,69	610	973	2340,5	2651,4	2680,9	1177,3	-310,9	-340,4	490,2	563,9	1,13-1,15	0,50	
28-6	7,0-7,2	2,68	860	1335	5724,1	3678,2	3620,5	2270,2	2045,9	2103,6	490,2	563,9	0,64-0,63	0,40	
28-8	10,1-10,2	2,66	835	1289	4080,2	3590,0	3516,3	2111,4	490,2	563,9	714,8	794,1	0,88-0,86	0,52	
29-9	8,0-8,2	2,80	546	885	1605,2	2320,0	2399,3	995,6	714,8	794,1	Pa.10 ⁵ ;	1,45-1,49	0,62		
29-10	9,8-10,0	2,78	517	842	1443,1	2156,9	2251,3	889,8	713,8	808,2	713,8	808,2	1,49-1,56	0,62	
											$V = 35,7\%$				
31-5	6,0-6,2	2,69	415	637	2351,7	1499,9	1422,5	524,1	851,8	929,2	426,0	524,1	0,64-0,60	0,22	
31-9	8,6-8,8	2,69	446	747	1298,3	1715,3	1895,7	654,4	-417,0	-597,4	324,2	389,4	1,32-1,46	0,50	
33-4	3,0-3,2	2,83	437	704	1330,2	1654,4	1719,6	641,3	-324,2	-389,4	426,0	490,4	1,24-1,29	0,48	
33-5+6	4,0-5,0	2,85	437	647	1228,4	1654,4	1468,8	588,1	-426,0	-240,4	764,7	736,6	1,35-1,20	0,48	
33-8	8,8-9,0	2,80	538	841	1511,2	2275,9	2247,8	935,0	439,7	451,3	1210,3	1316,3	1,51-1,49	0,62	
33-9	9,4-9,6	2,83	739	1164	3664,6	3224,9	3213,3	1796,5	-1210,3	-1316,3	-113,2	-197,7	0,88-0,88	0,49	
33-10	10,0-10,2	2,79	739	1211	2014,6	3224,9	3330,9	1833,5	347,3	347,3	304,8	392,5	1,60-1,65	0,91	
34-1	6,0-6,3	2,76	325	526	656,0	769,2	647,1	612,6	2562,5	2562,5	1168,9	532,0	693,5	0,84-0,79	0,36
35-3	5,0-5,3	2,73	312	485	1039,6	1039,6	1039,6	647,1	2049,1	1638,3	596,5	394,7	410,8	0,81-0,80	0,29
36-3	8,6-8,9	2,73	625	935	3256,0	2724,0	2724,0	2189,4	685	2189,4	2189,4	2189,4	1186,1	0,81-0,80	0,29
22-5	2,4-2,6	2,70	437												
	Средние значения														

Коэффициент корреляции при использовании зависимости $E_d = 2989,4 \ln(V_s) - 16521$ имеет пределы: нижний – 0,79 верхний – 0,99.

Коэффициент корреляции при использовании зависимости $E_d = 2970,6 \ln(V_p) - 17758$ имеет пределы: нижний – 0,78 верхний – 0,99.

Сходимость результатов 76%.

Таблица 2. Результаты определения коэффициента Пуассона глинистых отложений из корреляционной связи $\mu = (V_s/V_p)$ Уравнение связи $\mu = 0,1132 (V_s/V_p)^{2,0492}$

№ сква- жины	Интервал опробования	По данным МСК			Лабораторное определение μ	Рассчитанное: $\mu = f(V_s/V_p)$ μ	Рассчитанное: $\frac{1-2(V_s/V_p)^2}{2-2(V_s/V_p)^2}$, μ	Ошибки по V_s/V_p по формуле	Погрешности	Отношение рассчитанного значения к истинному (V_s/V_p – формула)
		V_s , м/с	V_p , м/с	V_s/V_p						
13-4	3,8-4,2	752	1207	0,623	0,27	0,30	0,18	-0,02	0,09	1,11-0,67
13-5	5,6-6,0	752	1474	0,510	0,32	0,45	0,32	-0,13	0,00	1,41-1
18-6	9,0-9,1	752	1474	0,510	0,35	0,45	0,32	-0,1	0,03	1,29-0,91
32-7+8	9,8-10,1	693	1027	0,675	0,25	0,25	0,08	0	0,17	1-0,32
21-5	5,6-5,8	840	1327	0,633	0,29	0,29	0,16	0	0,13	1-0,55
21-6	7,0-7,3	410	638	0,642	0,30	0,28	0,15	0,02	0,15	0,93-0,50
25-5	4,1-4,2	480	784	0,612	0,31	0,31	0,20	0	0,11	По лаборатор- ным данным: $\sigma = \pm 0,02; V = 6,9\%$
28-4	3,0-3,3	332	537	0,618	0,30	0,30	0,19	0	0,11	По лаборатор- ным данным по формулам:
28-5	6,0-6,2	610	973	0,627	0,30	0,29	0,17	0,01	0,13	$\sigma = \pm 0,02; V = 6,9\%$
28-6	7,0-7,2	860	1335	0,644	0,27	0,28	0,15	-0,01	0,12	$\sigma = \pm 0,02; V = 6,9\%$
28-8	10,1-10,2	835	1289	0,648	0,27	0,28	0,14	-0,01	0,13	1-0,65
29-9	8,0-8,2	546	885	0,617	0,29	0,30	0,19	-0,01	0,11	1-0,63
29-10	9,8-10,0	517	842	0,614	0,31	0,31	0,20	0	0,13	0,97-0,57
31-5	6,0-6,2	415	637	0,652	0,29	0,27	0,13	0,02	0,16	1-0,65
31-9	8,6-8,8	446	747	0,597	0,32	0,33	0,22	-0,01	0,10	1,04-0,52
33-4	3,0-3,2	437	704	0,621	0,31	0,30	0,19	0,01	0,12	1,03-0,66
33-5+6	4,0-5,0	437	647	0,675	0,24	0,25	0,08	-0,01	0,16	0,93-0,45
33-8	8,8-9,0	538	841	0,640	0,26	0,28	0,15	-0,02	0,11	1-0,65
33-9	9,4-9,6	739	1164	0,635	0,29	0,29	0,16	0	0,13	1-0,55
33-10	10,0-10,2	739	1211	0,610	0,31	0,31	0,21	0	0,10	1-0,68
34-1	6,0-6,3	325	526	0,618	0,31	0,30	0,19	0,01	0,12	0,97-0,61
35-3	5,0-5,3	312	485	0,643	0,27	0,28	0,15	-0,01	0,12	1,04-0,56
36-3	8,6-8,9	625	935	0,668	0,27	0,26	0,09	0,01	0,18	0,96-0,33
22-5	2,4-2,6	437	685	0,638	0,30	0,28	0,16	-0,02	0,14	0,93-0,53
Средние значения				0,29		0,30	0,17			1,03-0,59

Нижний предел коэффициента корреляции при использовании связи $\mu = 0,1132 (V_s/V_p)^{2,0492}$ равен 0,80.
 Верхний предел коэффициента корреляции при использовании связи $\mu = 0,1132 (V_s/V_p)^{2,0492}$ равен 0,98.
 Сходимость результатов при допустимой погрешности $\pm 0,01$ составляет 74,7%.

Таблица 3. Определение динамического модуля упругости Е и коэффициента Пуассона μ посредством скоростей сейсмических волн V_s , V_p для глинистых грунтов ВЧР Южного Торгая

Определяемая характеристика	Границы применения	Уравнение связи	Единицы измерения	Коэффициент корреляции
Динамический модуль упругости E_d	$647,1 < E_d < 3678,2$	$E_d = 3002,4 \ln(V_s) - 16599$ $E_d = 2995 \ln(V_p) - 17916$	$10^5 \text{Па}, \text{м/с}$	$0,79 < \rho < 0,99$ $0,78 < \rho < 0,99$
Коэффициент Пуассона μ	$0,24 < \mu < 0,35$	$\mu = 0,1132(V_s/V_p)^{-2,0492}$ $\mu = [1 - 2(V_s/V_p)^2]/[2 - 2(V_s/V_p)^2]$	единицы, м/с	$0,80 < \rho < 0,98$

Корреляционная связь коэффициента Пуассона и сейсмических характеристик установлена двумя методами – графическим и с использованием математической зависимости, предложенной Н.Н. Горяиновым. В обоих случаях было взято отношение скоростей поперечных и продольных волн V_s/V_p .

Среднеквадратичное отклонение в массиве лабораторных данных составляет $\pm 0,02$ при коэффициенте вариации 6,9%. При использовании выявленной связи коэффициент корреляции составляет $0,8 < \rho < 0,98$ – здесь прослеживается достаточно четкая корреляционная связь. Данные статистической обработки значений, полученных посредством формулы (табл. 2), почти в 10 раз превышают статистику лабораторного ряда: среднеквадратичное отклонение равно $\pm 0,2$, коэффициент вариации – 72,8%. Полученные значения по формуле меньше истинных в 0,59 раз. Это доказывает, что использовать такую формулу (графа 8, табл. 2) рекомендуется лишь для определения приближенного значения коэффициента Пуассона.

Для установления корреляционной связи между сейсмическими характеристиками и коэффициентом Пуассона графическим способом была использована степенная зависимость. В качестве аргумента было взято отношение V_s/V_p . Данные V_s/V_p и лабораторные значения μ взаимосвязаны друг с другом с коэффициентом корреляции 0,8. Уравнение регрессии имеет вид

$$\mu = 0,1132 (V_s/V_p)^{-2,0492}.$$

Значения, полученные при использовании выведенной связи и величины V_s/V_p , имеют коэффициент корреляции 0,98, при этом сходимость результатов 75 %. Среднеквадратичное отклонение от истинного значения $\pm 0,04$, коэффициент вариации 13,3%.

В пределах распространения Южно-Торгайского осадочного бассейна при разведке место-

рождений углеводородного сырья был выполнен большой объем сейсморазведочных работ методом МСК. Благодаря этому был собран богатый сейсмический материал по рыхлому чехлу. Детально (3D- трехмерная сейсморазведочная съемка) были исследованы три участка, расположенные на площади листа L-41-XVIII: Акшабулак (МСК 25 скважин), Ащисай (МСК 60 скважин), Аксай-Нуралы (МСК 180 скважин). На основании выведенных зависимостей легко можно определить упругие свойства глинистых отложений по данным сейсморазведки. К использованию рекомендуются математические формулы табл. 3.

Одним из самых важных достоинств сейсмических методов является возможность определения инженерно-геологических показателей грунтов без отбора образцов, т.е. без нарушения сплошности массива и естественной структуры грунта. Это преимущество особенно сказывается при изучении свойств рыхлых грунтов, отбор ненарушенных образцов которых сложен, а подчас и невозможен. Сейсмические методы также позволяют изучать интересующие нас свойства грунтов в любых объемах, при желании даже соизмеримых с размерами будущего сооружения. Это особенно важно в свете современных представлений о горных породах, согласно которым свойства породы в малом образце могут быть весьма далеки от свойств той же породы в большом массиве в условиях естественного залегания.

ЛИТЕРАТУРА

- Горяинов Н.Н., Ляхович Ф.М. Сейсмические методы в инженерной геологии. М.: Недра, 1979. С.121-130.
- Закрякин В.К. Курс петрофизики для инженеров. Алматы, 2003.183 с.
- Ляхович Ф.М. Методика и интерпретация данных сейсморазведки при инженерно-геологическом картировании. М.: ВИЭМС, 1970. 140 с.
- Никитин В.Н. Основы инженерной сейсмики. М.: МГУ, 1981. С.124-140.