

В. И. БИБАНОВ, В. Б. ГРАБЕК, Н. Д. КРАСНИКОВ,
О. С. ПОДКАМИНЕР, Е. В. СЕМИШИН

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДОВ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ ПРИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЯХ

В работе дается описание опыта применения методов сейсморазведки и сейсмокаротажа при осуществлении инженерно-геологических изысканий строительных площадок.

В настоящее время при проведении сейсмического микрорайонирования городов и крупных промышленных районов, при инженерно-геологических изысканиях под инженерные и гидротехнические сооружения и в некоторых других случаях все более широко используются методы сейсморазведки и сейсмокаротажа буровых скважин.

С помощью этих методов при инженерно-геологических изысканиях может решаться широкий круг разнообразных вопросов, в частности, может производиться:

1) определение глубины залегания и рельефа кровли коренных скальных пород, подстилающих верхнюю толщу осадочных отложений;

2) обнаружение и прослеживание областей нарушения сплошности горных пород (бросов, зон трещиноватости, закарстованных областей, погребенных оврагов, русел рек и др.), перекрытых четвертичными отложениями;

3) определение уровня залегания грунтовых вод (обводненных пластов) в четвертичных отложениях и границ их распространения в пределах площадки;

4) определение границ раздела между различными напластованиями грунтов оснований, отличающихся по акустическим свойствам (по плотностям и значениям скоростей распространения упругих волн);

5) количественное определение динамических упругих характеристик грунтов (скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн) в различных пластах по глубине геологического разреза.

Необходимо отметить, что при детальном сейсмическом микрорайонировании и инженерно-геологических изысканиях площадок под промышленно-гражданское строительство обычно производится изучение строения самой верхней толщи покровных отложений на глубину до нескольких десятков метров. Только при изысканиях площадок под наиболее крупные инженерные и гидротехнические сооружения глубина исследований может достигать сотен метров. Очевидно, что примерно до этих же глубин должны производиться сейсморазведочные работы при инженерно-геологических изысканиях.

В зависимости от целей сейсмологических изысканий, имеющейся аппаратуры и конкретных условий в месте расположения обследуемых участков (их геологического строения, характера и свойств сейсмических границ и т. п.) решение вышеперечисленных, а также некоторых других задач может осуществляться с помощью различных методов сейсморазведки: метода преломленных (продольных и поперечных)

волн [1, 2, 4], путем использования различных типов обменных волн [10], метода отражений на поперечных волнах [2], с помощью параметрических измерений скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн в грунтах, выходящих на дневную поверхность.

При наличии на изыскиваемых площадках буровых скважин для решения ряда задач могут применяться различные методы сейсмокаротажа: прямой сейсмокаротаж с помощью одиночных сейсмоприемников или группы сейсмоприемников в виде многоприборного зонда [3, 12, 13], трехкомпактный сейсмокаротаж [5], обращенный сейсмокаротаж [3, 12, 13].

Методы сейсморазведки и сейсмокаротажа могут применяться как при рекогносцировочных изысканиях на стадии выбора площадок, для строительства различных сооружений, так и при детальных инженерно-геологических изысканиях на выбранных площадках. В зависимости от стадии изысканий (рекогносцировочная или детальная разведка площадок) перед указанными методами обычно ставятся различные задачи. Так при рекогносцировочных изысканиях в пределах заданного района, как правило, производится только определение глубины и рельефа залегания кровли коренных скальных пород, определение уровня залегания грунтовых вод, обнаружение и прослеживание областей нарушения сплошности горных пород и попутное выделение основных (наиболее резких) сейсмических границ. При детальных инженерно-геологических изысканиях на выбранных площадках должно производиться более тщательное и подробное изучение тех же задач, в пределах выбранной площадки, с расчленением сейсмологического разреза на более мелкие слои и определением упругих характеристик (скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн) для различных напластований грунтов.

Таким образом, выбор соответствующих методов сейсморазведки, методики полевых наблюдений, детальности работ и т. п. в основном зависит от стадии изысканий, задач исследований и конкретных инженерно-геологических и сейсмологических условий в районе проведения сейсморазведочных работ.

Однако следует отметить, что несмотря на большую перспективность для указанных целей методов сейсморазведки и сейсмокаротажа, их применение при инженерно-геологических изысканиях не получило еще должного развития и распространения. В литературе имеются пока лишь отдельные более или менее удачные примеры использования различных методов сейсморазведки [1, 2, 4, 6—11, 14—16] и сейсмического каротажа [3, 5, 12, 13] для решения некоторых частных (из числа приведенных выше) задач. Примеров одновременного комплексного использования различных методов сейсморазведки и сейсмокаротажа при инженерно-геологических изысканиях строительных площадок для решения определенного круга рассмотренных вопросов в литературе пока не имеется.

Ниже приводится пример комплексного использования авторами данной статьи методов сейсморазведки и сейсмокаротажа при проведении инженерно-геологических изысканий на одной из строительных площадок для решения следующих задач: определения глубины залегания кровли коренных пород (известняков); изучения сейсмического разреза осадочной толщи (до глубины залегания известняков) на участке размерами примерно $0,5 \times 0,5$ км; определения упругих характеристик грунтов (скоростей распространения упругих волн).

Точных данных о геологическом строении площадки в момент проведения полевых сейсморазведочных и сейсмокаротажных работ не

имелось. Бурение разведочных скважин проводилось в момент окончания сейсмогеологических изысканий. Участок исследований имел сглаженный рельеф, максимальная разность абсолютных отметок в пределах участка не превышала 1,5 м.

При производстве полевых наблюдений использовалась стандартная малогабаритная 24-канальная сейсмическая станция СС-24п, установленная на автомашине ГАЗ-69. Регистрация волн осуществлялась электродинамическими сейсмоприемниками СПЭД-56. При измерениях в скважинах использовались: специальный 3-компактный скважинный сейсмоприемник и зонд из 7 гидроизолированных приборов СПЭД-56.

На основе имевшихся предварительных сведений о геологическом строении площадки решение поставленных задач осуществлялось с помощью метода преломленных волн, сейсмического каротажа скважин, бурения с измерением скоростей распространения продольных и поперечных волн и параметрических измерений скоростей распространения поперечных волн в породах, выходящих на дневную поверхность. Полевые работы, за исключением каротажа были окончены до начала буровых работ. Изучение осадочной толщи для получения сведений о характере строения среды, глубинах залегания преломляющих горизонтов, величинах граничных скоростей осуществлялась простреливанием профилей различной долины. Система наблюдений—отдельные сейсмозондирования. Всего выполнено 6 сейсмозондирований. При этом все профили простреливались с двух сторон с тем, чтобы всегда получать удобную для интерпретации систему встречных годографов.

Для определения глубины залегания верхнепермских известняков был прострелян при двух расстановках сейсмоприемников профиль № 1 длиной 781 м. Шаг расстановки приборов по профилю составлял 17 м. Возбуждение колебаний производилось взрыванием зарядов ВВ в узких шурфах ($0,3 \times 0,3$ м), глубина заложения зарядов равнялась 1,0—1,5 м. Вес одного заряда составлял 3—6 кг. Для отметки взрыва использовалась отдельная магистраль. Из-за наличия сильных помех, регистрация преломлений велась при узкой полосе пропускания усилителей, соответствовавшей фильтрации 30—45 гц и небольшом коэффициенте усиления (5-е положение регулятора усиления). Выбранные приемы регистрации обеспечили получение четких вступлений преломленных волн от границы известняков.

Промежуточные границы раздела изучались постановкой крестового зондирования по профилям II и III. Длина каждого из профилей 165 м, шаг расстановки приборов переменный, посередине профиля равен 10 м, у пунктов взрывов—3—5 м. Взрывы производились в неглубоких шурфах (глубина 0,4—0,5 м). При выборе оптимальных условий регистрации преломленных волн (фильтрация, усиление, заряд) взрывы производились с изменением расстояния «пункт взрыва»—прибор в последовательности 5, 3, 1 м. Вес заряда составлял 400 г.

Мелкозалегающие горизонты изучались простреливанием коротких профилей (IV и V), располагавшихся посередине площадки строительства. Длина каждого из профилей составляла 47 м, шаг расстановки приборов 2 м. Возбуждение колебаний производилось ударами (сбрасыванием с определенной высоты груза весом 40 кг). Для отметки момента возбуждения использовался отдельный сейсмоприемник, установленный в той же лунке, где производился удар.

Сейсмокаротажные наблюдения производились с целью более точного определения значений пластовых (v_p) и средних (\bar{v}) скоростей распространения продольных и поперечных волн по глубине геологического разреза. Для проведения измерений использовались две обса-

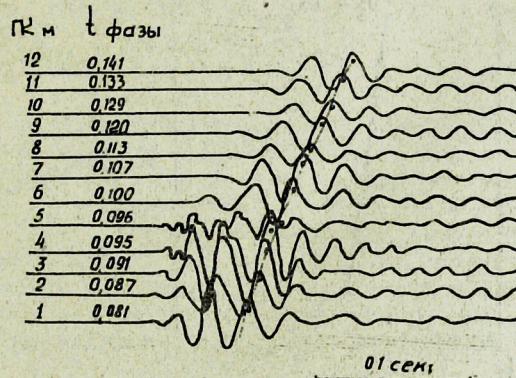
женные металлическими трубами скважины, заполненные глинистым раствором. Глубина исследований составляла по одной скважине—40 м, а по другой—60 м.

Регистрация продольных волн в скважинах № 1 и 13 осуществлялась 7-приборным зондом с базой между приборами, равной 2 м. Для изготовления зонда использовались сейсмоприемники СПЭД-56, гидроизолированные на давление 7 атмосфер. В качестве подводящего кабеля применялся провод ПВР.

Регистрация поперечных волн в скважине № 13 производилась специальным 3-компонентным скважинным прибором с прижимным устройством [5]. В качестве вертикального датчика в приборе использовался сейсмоприемник СП-15. Поперечные волны регистрировались двумя низкочастотными (собственная частота 5 гц) горизонтальными приборами с подвесом инертной массы на закручивающейся нити; датчики были развернуты друг относительно друга на 90°. Возбуждение волн производилось с помощью ударов. Пункт возбуждения находился на расстоянии 1 м от устья скважины. Точки наблюдения располагались на глубинах 60, 50, 40, 30, 25, 20 м и выше к устью через каждые 2 м. При проведении замеров 3-компактный зонд удерживался в скважине силой прижимного устройства, а кабель оставался ненагруженным. Поэтому кабельной волны не наблюдалось. Описанная методика проведения полевых наблюдений позволила получить сейсмограммы хорошего качества.

Скорости распространения поперечных волн в первом от дневной поверхности слое (супесях) определялись с помощью параметрических наблюдений по схеме УУ [1, 2] вдоль профиля VI. Длина профиля составляла 92 м, шаг расстановки приборов равнялся 1 м. Пункт возбуждения располагался в центре профиля. Возбуждение поперечных волн производилось с помощью горизонтальных (касательных к поверхности грунта) ударов в перпендикулярном направлении к профилю наблюдения, по торцу метрового отрезка бревна. На поверхности последнего имелись вырубки для лучшего его контакта с грунтом. Перед началом опытных работ отрезок бревна закапывался в узкий шурф в горизонтальном (\perp профилю наблюдения) положении с тщательным утрамбовыванием грунта. Регистрация поперечных волн осуществлялась обычными вертикальными сейсмоприемниками СПЭД-56. Они устанавливались по профилю с одинаковым интервалом и ориентировались в горизонтальном, перпендикулярном линии наблюдения направлении, т. е. в плоскости поляризации регистрируемой поперечной волны. Известно [1, 2], что такая схема наблюдений является наиболее благоприятной для возбуждения и регистрации поперечных волн, поляризованных в горизонтальной плоскости перпендикулярно линии наблюдения.

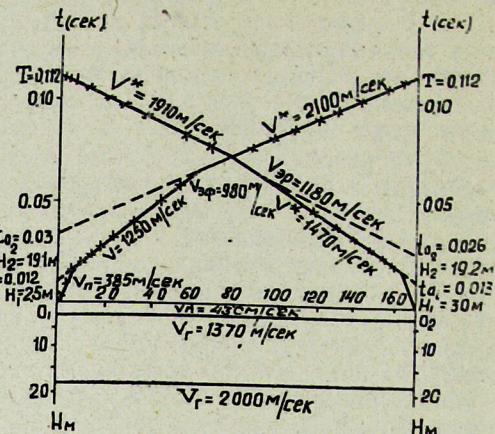
На фиг. 1 в качестве примера приведен образец сейсмограммы с четкой записью поперечных волн.



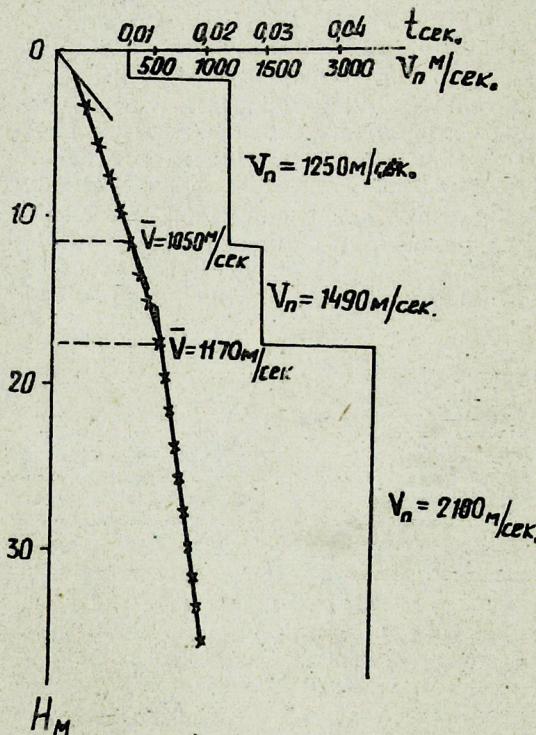
Фиг. 1. Сейсмограмма с записью прямой поперечной волны: способ возбуждения—удар, схема наблюдения УУ, усиление—5, фильтрация 30—45.

По результатам наблюдений методом преломленных волн были построены сейсмические разрезы для каждого профиля, один из которых показан на фиг. 2. Интерпретация материалов наблюдений при определении глубины залегания известняков и скорости распространения в них упругих продольных волн производилась с помощью метода полей времен [4]. Интерпретация гидографов преломленных волн по профилям II, III, IV, V осуществлялась способом t^o [4]. При этом глубина залегания преломляющих слоев определялась под пунктами возбуждения. Средние скорости определялись по данным сейсмического каротажа. Вычисление эффективных скоростей $V_{\text{эфф}}$ производилось по точкам пересечения гидографов преломленных волн.

Результаты интерпретации сейсмокарстовых наблюдений представлены в виде скоростных колонок (фиг. 3) в сопоставлении с дан-



Фиг. 2. Сейсмический разрез и гидографы преломленных волн по одному из профилей.



Фиг. 3. Вертикальный гидограф и график пластовой скорости продольных волн по одной из скважин.

ными бурения. Обобщенные данные о скоростях распространения продольных и поперечных волн в грунтах представляются в виде сводного сейсмического разреза по контуру развернутого четырехугольника, в углах которого расположены пункты взрывов (O_1 и O_2) для профилей II и III. Для сопоставления наблюденных сейсмических границ с геологическими на разрезе приводятся буровые колонки по скважинам № 1 и 2. Результаты сравнения сейсмогеологического разреза площадки, полученного с помощью метода преломленных волн и сейсмического каротажа скважин, с данными разведочного бурения показывают их удовлетворительную сходимость. Некоторое различие между глубиной залегания сейсмических и геологических границ объясняется тем, что скважины № 1 и 2 были несколько смещены относительно профилей наблюдения I и II.

Таким образом, применение методов сейсморазведки и сейсмокаротажа буровых скважин на данной площадке позволило расчленить разрез на 5 слоев, каждый из которых характеризовался значениями пластовых (v_p) и граничных (v_s) скоростей распространения продольных и поперечных волн. Первая преломляющая граница, отмеченная на глубине около 5 м от поверхности, проходит в слое супесей и суглинков, слабо различающихся по скоростям распространения упругих волн. Она, очевидно, связана с уровнем залегания грунтовых вод. На глубине примерно 9 м от поверхности проходит граница раздела между суглинками и слоем песчаных грунтов. Далее на отметках 16—20 м проходит граница раздела между слоем песчаных грунтов и 50-метровой толщиной моренных отложений. Геологическая граница между моренными отложениями и слоем мелкозернистых светло-серых песков, расположенная на отметках 77—79 м, по данным сейсморазведочных работ, методом преломленных волн не установлена (по-видимому из-за явлений экранирования слоя песчаных грунтов более высокоскоростными моренными стложениями). На глубинах 100—102 м от поверхности по данным сейсморазведки определено залегание кровли известняков. Полученный сейсмический разрез площадки хорошо дополняет данные инженерно-геологических изысканий. По приведенным данным, т. е. по скоростям распространения упругих продольных и поперечных волн и плотностям супесчаных и суглинистых грунтов могут быть определены значения динамических модулей упругости E_g и коэффициентов Пуассона μ (см. таблицу).

Т а б л и ц а

Глубина отбора образцов в м	Наименование грунтов	Плотность грунта $\rho_{ест}$ $\frac{т\ сек.^2}{м^4}$	Скорости упругих волн, м/сек.		$\frac{V_s}{V_p}$	Модуль упругости E_g $\frac{кг}{см^2}$	Коэффициент Пуассона μ
			продольных V_p	поперечных V_s			
4,5— 4,7	Супеси	0,234	450	180	0,40	$2,14 \cdot 10^3$	0,405
6,9— 7,1	Верхний слой суглинков	0,227	1250	290	0,232	$5,54 \cdot 10^3$	0,465
34,0— 34,2	Нижний слой суглинков	0,232	2100	610	0,29	$2,50 \cdot 10^4$	0,453

Из изложенного видно, что привлечение методов сейсморазведки и сейсмокаротажа для решений целого ряда задач при инженерно-геологических изысканиях, связанные с относительно небольшими дополнительными затратами (по сравнению с общей стоимостью проектно-изыскательских и строительных работ, в особенности при возведении крупных инженерных и гидротехнических сооружений) позволяет получить очень ценные данные о сейсмогеологическом разрезе строительных площадок и скоростях распространения в грунтах упругих продольных и поперечных волн, что особенно важно для районов повышенной сейсмичности.

Следует отметить, что большим преимуществом методов сейсморазведки и сейсмокаротажа по сравнению с обычными методами инженерно-геологических изысканий является возможность получения све-

дений об упругих свойствах грунтов в условиях их естественного залегания. Особенно важное значение это имеет для грунтов, не допускающих возможности отбора образцов ненарушенной структуры, а также для трещиноватых скальных пород при необходимости оценки их свойств «в массиве». Использование этих методов позволяет также обеспечить непрерывное прослеживание всех особенностей инженерно-геологического строения площадки и изменений упругих свойств грунтов основания по определенному направлению или в пределах определенного участка строительной площадки. При использовании обычных методов это потребовало бы проведения большого объема буровых работ с массовым отбором бразцов грунта ненарушенной структуры для лабораторных исследований. Методы сейсморазведки и сейсмокаротажа по сравнению с обычными методами изысканий отличаются очень высокой производительностью. Поэтому их широкое внедрение в практику позволяет значительно сократить время, необходимое для проведения инженерно-геологических изысканий площадок под проектируемые сооружения и резко снизить (особенно при рекогносцировочных работах) объем дорогостоящих буровых разведочных работ, которые могут проводиться лишь в отдельных точках сейсмического профиля для проверки данных сейсморазведки.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. П. Волин, А. Г. Рудаков. О сейсморазведочных работах на поперечных волнах. Прикладная геофизика, вып. 15, 1956.
2. А. П. Волин. Опыт регистрации отраженных поперечных волн. Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн, вып. 2, Л., 1959.
3. В. С. Вуюцкий. К проблеме сейсмокаротажа. Бюлл. нефтяной геофизики, вып. 4, 1937.
4. И. И. Гуревич. Сейсмическая разведка, Гостоптехиздат, М., 1960.
5. В. В. Жадин. Об исследовании поглощения продольных и поперечных волн способом сейсмического каротажа. Геология и геофизика СОАН СССР, № 3, 1960.
6. М. С. Иоселиани, Г. Я. Мурусидзе. К вопросу применения сейсмических методов к решению некоторых задач инженерной геологии. Тр. Ин-та геофизики АН Груз. ССР, т. 16, 1957.
7. Е. В. Карус, И. П. Пасечник. Изучение упругих и поглощающих свойств горных пород в их естественном залегании методом сейсмоакустики. Изв. АН СССР, сер. геофиз., 6, 1954.
8. Г. А. Лямин. Об определении сейсмических свойств грунтов при помощи передвижной сейсмостанции. Тр. Ин-та физики Земли АН СССР, № 10, 1960.
9. Ф. М. Ляхович, О. Г. Сорохтин. Об определении упругих постоянных сейсмических методом. Бюлл. НТИ Гидропроекта, № 13, 1961.
10. В. Н. Никитин. Опыт регистрации обменных преломленных волн типа $P_1 S_2 P_1$ с целью вычисления упругих характеристик диабазов, скрытых под наносами, Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 8, 1959.
11. В. Н. Никитин, А. И. Савич. Сейсморазведка при инженерно-геологических изысканиях для гидротехнического строительства. «Гидротехническое строительство», № 2, 1962.
12. Н. Н. Пузырев. Измерение сейсмических скоростей в скважинах, Гостехиздат, М., 1956.
13. А. Н. Островский. О сейсмокаротаже. ДАН СССР, 45, № 5, 196, 1944.
14. Н. И. Халевин. К вопросу об измерении скоростей упругих волн в условиях естественного залегания горных пород. Тр. Горногеологического ин-та, вып. 30, геофиз. сб., № 2, 1957.
15. R. N. Tolliv. Investigation of shear waves. Geophysics, 21, № 4, 1956.
16. F. F. Evison. Seismic waves from a transducer at the Surface of Stratified ground. Geophysics, 21, № 4, 1956.