

УДК 550.834:622.12

АНАЛИЗ ИНФОРМАТИВНОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО МЕТОДА ПРИ ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ ОПОЛЗНЕОПАСНЫХ СКЛОНОВ

Азаров Н.Я., Тиркель М.Г.

(УкрНИИМИ НАНУ, г. Донецк, Украина)

Федин М.М.,

(ООО "Южнобережный Центр Изысканий", АР Крым, г. Алушта)

На прикладах району західної околиці м. Бердянська й інших ділянок реальних зсувних схилів надані результати аналізу інформативності сейсмічних хвильових полів і рекомендації по вибору оптимальних частотних діапазонів проведення сейсмічних досліджень з визначення рівня ґрунтових вод.

By the examples of western outskirts of Berdyansk city and areas of other real landslide-hazardous slopes the results of analysis of seismic wave fields and recommendations for choosing the optimum frequency range for seismic exploration with the aim to determine underground water level are given.

При хозяйственном освоении территорий оползни являются одним из наиболее опасных инженерно-геологических факторов, которые, приводя в аварийное состояние здания и сооружения, наносят большой материальный ущерб [1, 2]. Возрастающие темпы строительства увеличивают техногенную нагрузку на осваиваемые территории, что обуславливает необходимость более глубокого исследования склонов с целью мониторинга и прогноза их состояния для оперативного принятия решений по инженерной защите от опасных экзогенных процессов. Надежные оценки состояния склонов могут быть получены только на основе ком-

плексных инженерных изысканий, информативность и оперативность которых возрастает при использовании результатов сейсморазведочных исследований. При этом выбор оптимальных частотных диапазонов проведения исследований является актуальной и чрезвычайно сложной задачей. Эффективность и надежность метода возрастает, если при выборе методики проведения исследований и обработке полученных результатов использовать методы математического моделирования [3, 4] для анализа кинематических и динамических характеристик волнового поля.

В настоящей статье на примерах района западной окраины г. Бердянска и других участков оползневых склонов представлены результаты теоретического анализа информативности сейсмических волновых полей и рекомендации по выбору оптимальных частотных диапазонов проведения сейсмических исследований по определению уровня грунтовых вод (УГВ).

Для модели оползневого склона в районе западной окраины г. Бердянска вычисления проводились в несколько этапов. Моделировалось три уровня размещения УГВ (см. рис. 1):

- на границе между суглинками и песком;
- по центру пласта песка;
- на границе между песком и глиной.

Для каждого случая производился расчет волнового поля, возбуждаемого в исследуемом массиве горных пород отдельным источником сейсмических колебаний. Анализировалась структура теоретических сейсмотрасс, определялась природа и информативные характеристики волновых пакетов. При этом были использованы картины распределения смещений в плоскости профиля наблюдений, наборы теоретических сейсмограмм, рассчитанные скоростные, частотные спектры.

В зависимости от того, учитывается ли в модели фактор увлажнения, основные акустические границы меняют свою природу. В случае сухих пород наиболее резкой акустической границей является граница между песками и глинами. В случае учета обводненности наиболее резкой акустической границей является граница между сухим и влажным песком.

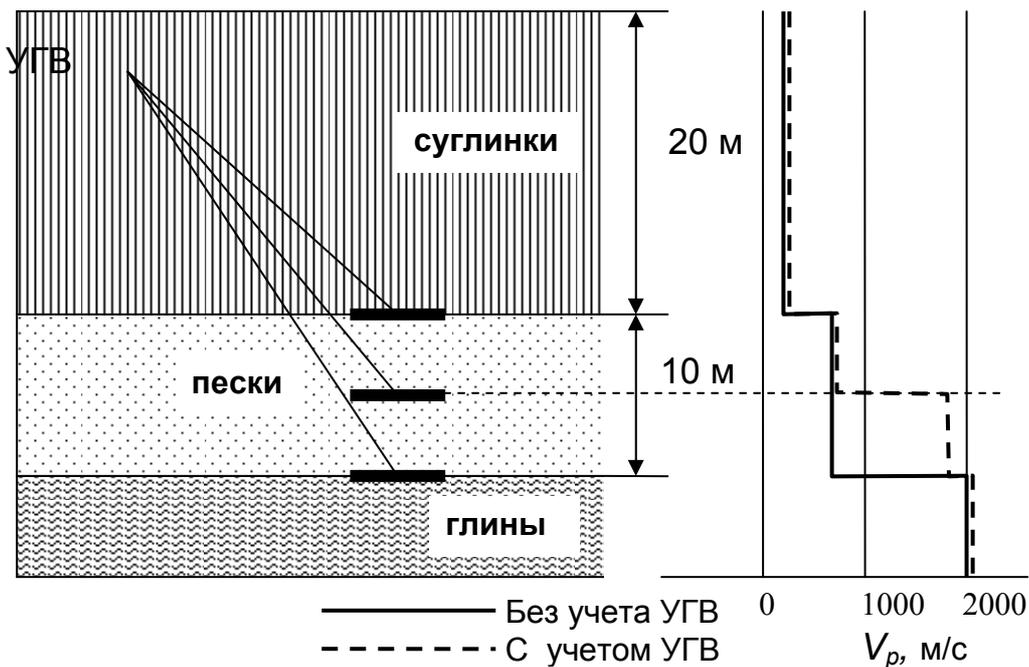


Рис.1. Модель оползневого склона в районе западной окраины г. Бердянск

Мокрый песок и глина имеют сходные плотности и скорости распространения продольных волн. Разница в значениях не превышает 10 %. В то же время, в модели во влажном песке путем ввода высокого значения коэффициента затухания гасятся поперечные волны.

На рис. 2 для примера представлены картины распределения смещений частиц среды в последовательные моменты времени для случая использования ударного вертикально направленного источника сейсмических колебаний с максимумом амплитудно-частотной характеристики на 150 Гц. Распределения рассчитаны для моментов времени $t = 0,125$ с, $t = 0,250$ с и $t = 0,375$ с.

Картины распределения компонент смещений показывают, что между дневной поверхностью и УГВ образуется подобие волновода. В зависимости от того, где располагается УГВ, структура волновода может быть различной. Наибольшей простотой отличается случай, когда весь песок увлажнен. Волновод имеет простое строение и состоит исключительно из пласта суглинка. В остальных случаях волновод имеет сложное строение и состоит из пласта суглинка и сухой части пласта песка. Между ними су-

существует дополнительная акустическая граница, которая может повлиять на структуру поля в волноводе. Однако, как показали расчеты, она практически не влияет на амплитуду волн, отраженных от УГВ.

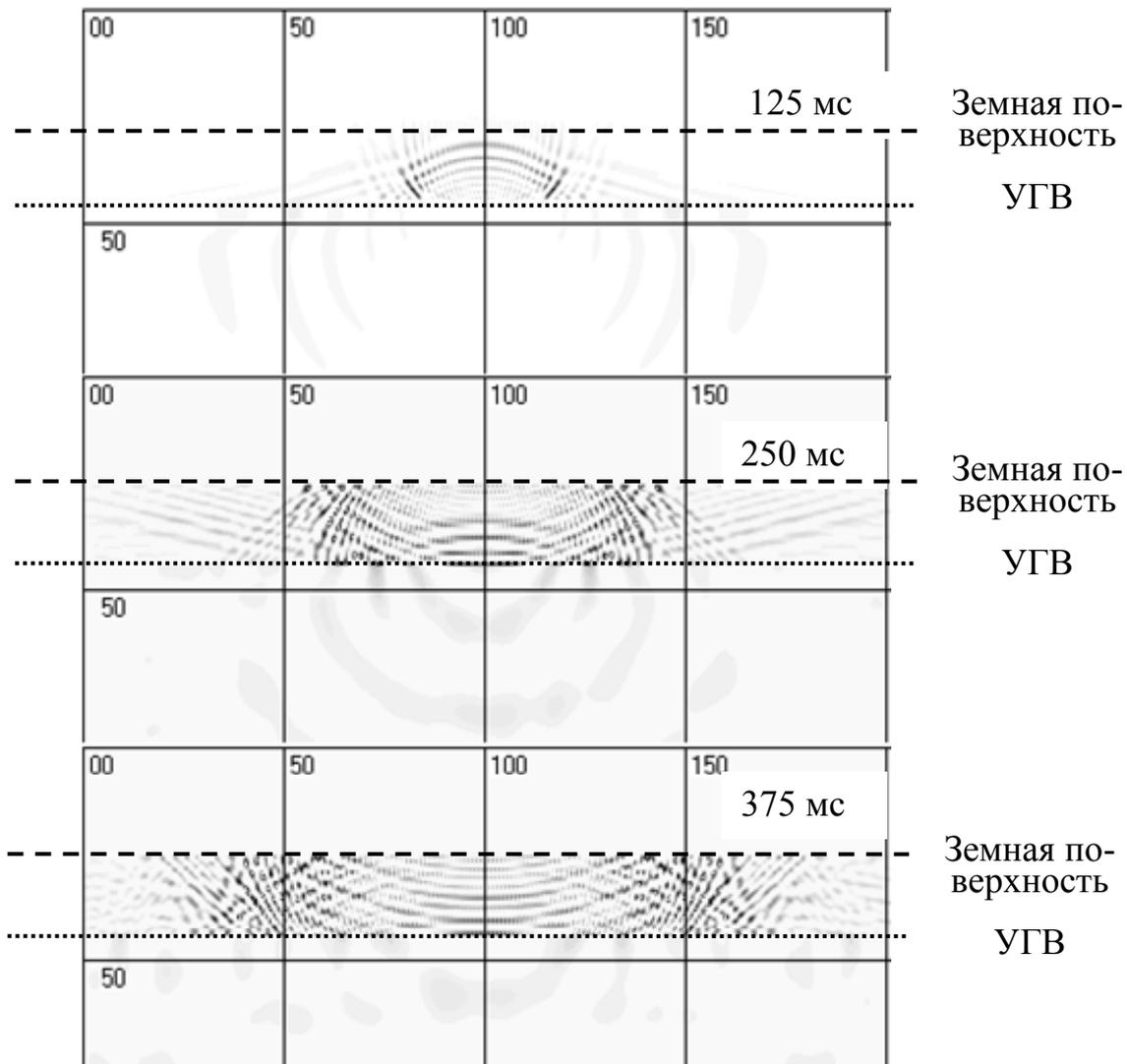


Рис. 2. Картины распределения смещений частиц среды в последовательные моменты времени

В волноводе формируется система многократно отраженных продольных и поперечных волн. Они распространяются с соответствующими породам волновода скоростями. Их фронты в породах в пересечении с плоскостью модели имеют форму дуг окружности.

Часть волн преломляется в породы ниже УГВ (влажный песок либо глину), образуя головные волны, распространяющиеся вдоль данной границы. В породах ниже УГВ их фронты в пересечении с плоскостью модели также имеют форму дуг окружности, а, преломляясь в вышележащие породы, образуют прямолинейные фронты. Такие закономерности соответствуют положениям теории.

Рассмотрим случай, когда уровень грунтовых волн располагается на границе между песком и глинами. Весь слой песка при этом не увлажнен.

На рис. 3 представлен набор теоретических сейсмограмм волнового поля. Частотная характеристика используемого источника имеет два характерных максимума на частотах 45 и 150 Гц. Система наблюдений представлена одним пунктом возбуждения (ПВ) и 24 сейсмоприемниками (СП), расположенными на дневной поверхности на одной линии. Расстояние между СП составляет 5м. СП № 1 совмещен с ПВ.

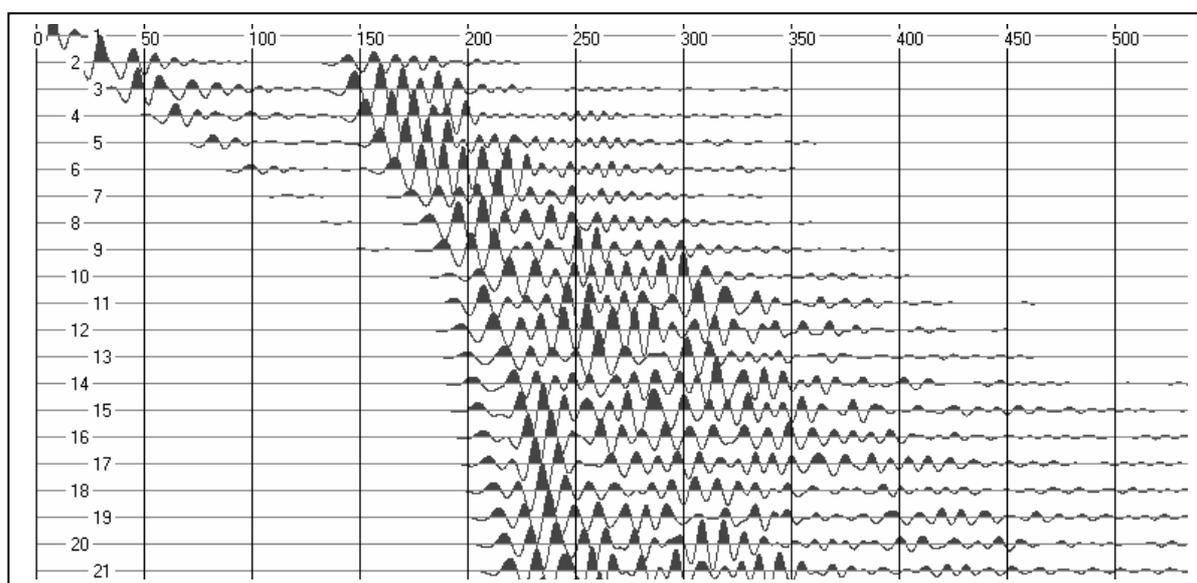


Рис. 3. Набор теоретических сейсмограмм. Случай необводненных песков

На сейсмограммах представлены следующие типы волн:
- прямые волны, распространяющиеся по песку от источника к сейсмоприемникам;

- система волн, многократно отраженных от уровня глин;
- головные волны, распространяющиеся вдоль границы глин.

На рис. 4 представлены теоретические сейсмические разрезы по методу общей глубинной точки (ОГТ), рассчитанные для случая, когда пункты возбуждения (всего 24 ПВ) последовательно располагаются на дневной поверхности в точках расположения каждого из сейсмоприемников.

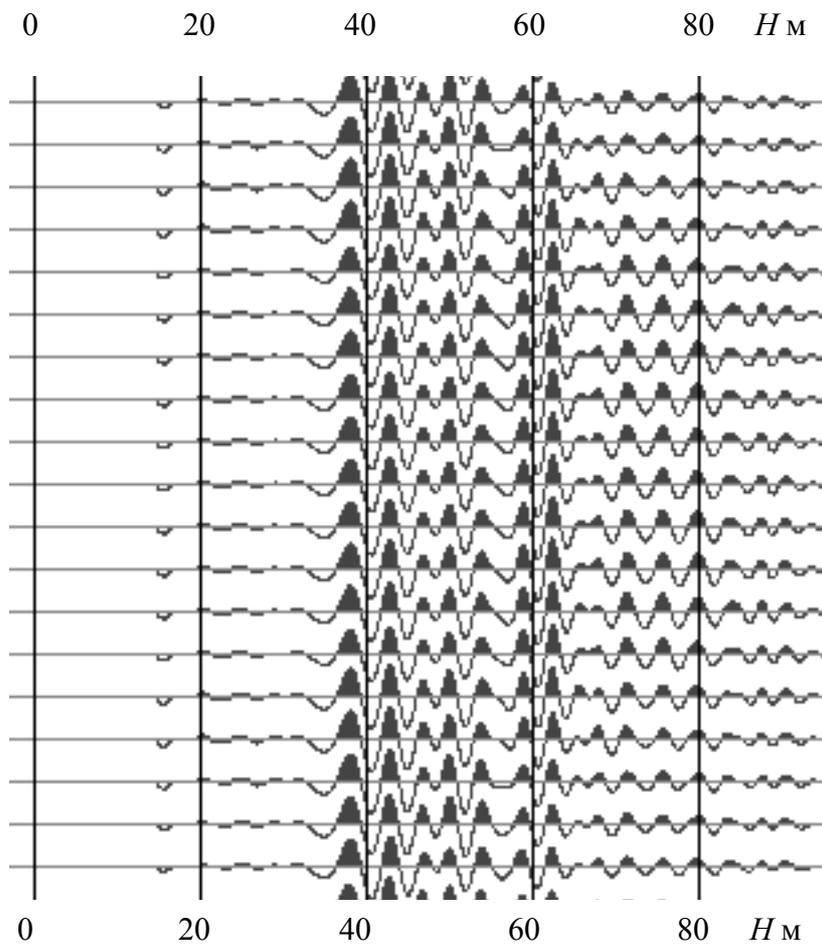


Рис. 4. Теоретические сейсмические разрезы ОГТ. Случай необводненных песков

На сейсмических разрезах четко проявляются волны, отраженные от верхней границы глин. Интерес представляет тот факт, что интенсивность данных волн зависит от используемой несущей частоты источника. На рис. 5 для иллюстрации данного яв-

ления представлена расчетная спектральная характеристика регистрируемого волнового поля. Производились расчеты без учета, а также с учетом фактора затухания сейсмических колебаний в суглинках и песке. При этом использовался изложенный в работах [1, 2] метод. Значение коэффициента пространственного затухания β варьировалось в пределах от $1.0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$, до $1.0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$.

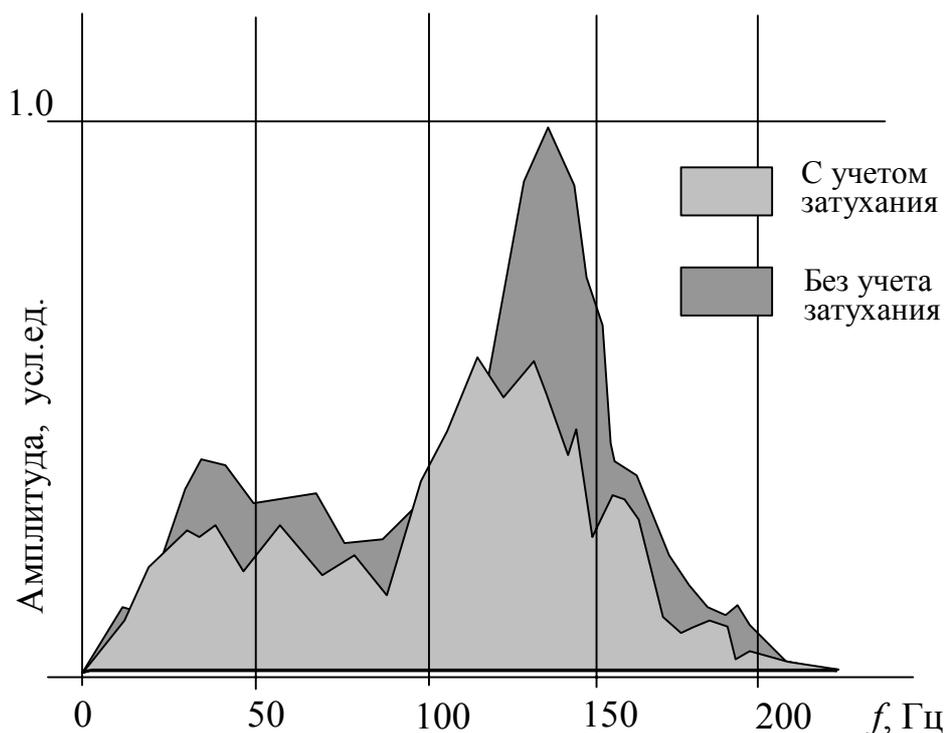


Рис. 5. Расчетная спектральная характеристика регистрируемого волнового поля с учетом фактора затухания колебаний и без такового

Анализ частотных спектров и сопоставление их с исходным спектром используемого источника свидетельствуют о том, что высокочастотная составляющая сигнала в большей степени отражается от уровня залегания глины. В то же время повышение рабочей частоты приводит к росту влияния фактора поглощения. Тем не менее, расчеты показывают, что для глубин 25 – 30 м, характерных для оползневого склона в районе западной окраины г. Бердянск целесообразно использование рабочих частот в диапазоне 100 – 150 Гц.

Перейдем к рассмотрению следующей модели, когда весь песок увлажнен (УГВ располагается на верхней границе песков).

На рис. 6 представлен соответствующий набор теоретических сейсмограмм. Использовался тот же источник и та же система наблюдений из 24 ПВ. Наблюдаются те же типы волн, что и в предыдущем случае. Сравнение теоретических сейсмограмм, изображенных на рис. 6 и рис. 3 показывает ряд особенностей.

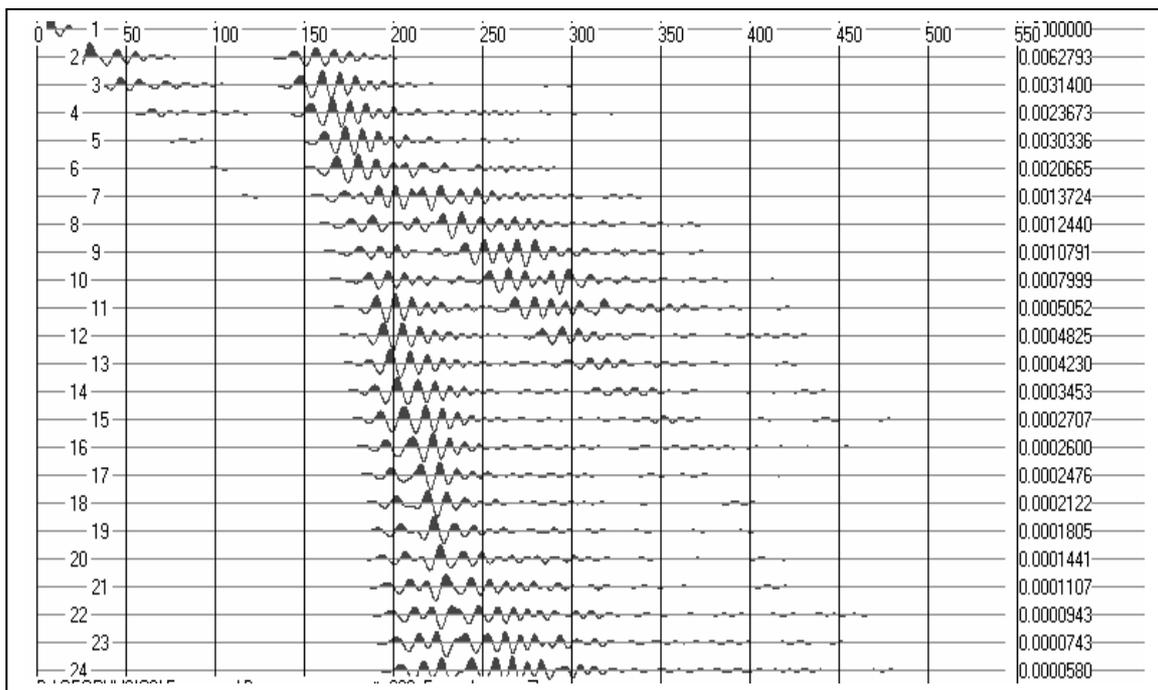


Рис. 6. Набор теоретических сейсмограмм. Случай, когда УГВ располагается на верхней границе песков

Во-первых, картина волнового поля изменилась слабо. Прямые волны, распространяющиеся по песку от источника к сейсмоприемникам, имеют относительно более слабую амплитуду за счет роста амплитуды остальных волновых пакетов. Система волн, многократно отраженных от уровня глин и от дневной поверхности распространяется вдвое меньшим по ширине скоростного окна цугом. Практически таким же образом ведут себя головные волны, распространяющиеся вдоль границы глин. Сравнение результатов расчетов на различных модификациях модели говорит о том, что данное явление наблюдается благодаря тому,

что теперь суглинки образуют волновод простого строения. Кроме того, увлажнение песка приводит к тому, что породы ниже суглинков для продольных волн образуют практически однородную среду.

Влажный песок представляет собой плотную среду с низким значением коэффициента затухания продольных волн. За счет этого головные волны имеют столь значительную амплитуду. Если для модели с сухим песком головная волна возбуждала вторичные поперечные и продольные волны, которые накладывались на общую картину колебаний, то в модели с влажным песком возбуждаются и распространяются преимущественно продольные волны. Поперечные волны затухают на коротких расстояниях. Этим объясняется наблюдаемая закономерность, когда головная волна наблюдается вдвое меньшим по ширине скоростного окна цугом.

На рис. 7 представлены теоретические сейсмические разрезы ОГТ, на которых очень четко проявляется УГВ. По сравнению с моделью с сухим песком, ширина несущего информацию волнового пакета уменьшилась в 1.5 раза. Расчеты проводились с учетом слабого затухания продольных и сильного затухания поперечных волн в увлажненном песке.

На рис. 8 представлена расчетная спектральная характеристика регистрируемого волнового поля. Анализ частотных спектров и сравнение их с исходным спектром используемого источника, а также со спектром колебаний, зарегистрированных в случае, когда песок не увлажнен, показывает ряд особенностей. Во-первых, относительно слабое затухание высокочастотных максимумов. Во-вторых, расширение высокочастотных пиков. Как показывает более детальный анализ, расширение высокочастотных пиков, возможно, происходит за счет более сильного влияния продольных головных волн, частотная характеристика которых имеет широкий спектр, а сами волны имеют значительную амплитуду.

В заключении рассмотрим модели, когда весь песок увлажнен до уровня половины его мощности. На рис. 9 представлен соответствующий набор теоретических сейсмограмм. Использовался тот же источник и та же система наблюдений.

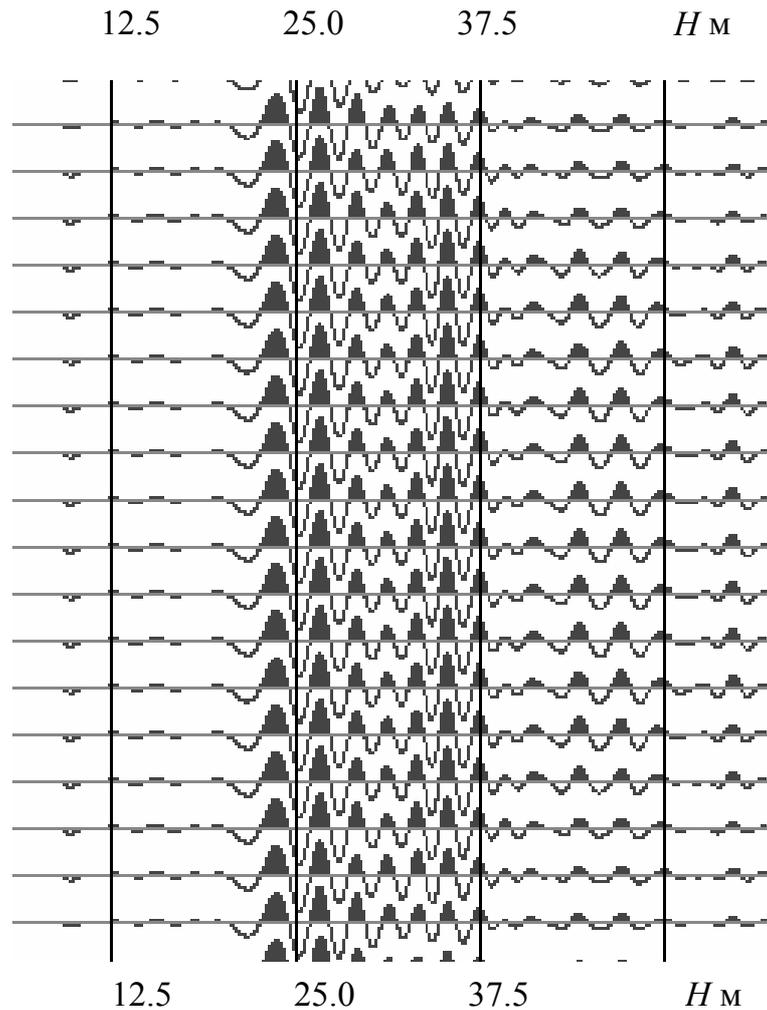


Рис. 7. Теоретические сейсмические разрезы ОГТ. Случай, когда УГВ располагается на верхней границе песков

Общая структура волнового поля практически не отличается от рассмотренных выше случаев, когда УГВ размещался на нижней либо верхней границах песка. Представлены прямые волны, распространяющиеся по песку от источника к сейсмоприемникам, многократно отраженные от УГВ и от дневной поверхности, а также головные волны. Суглинки и сухая часть песка образуют волновод сложного строения. Поэтому волновой пакет многократно отраженных волн имеет сложную структуру. Он состоит из нескольких последовательных цугов, образующих достаточно длительный по времени сигнал.

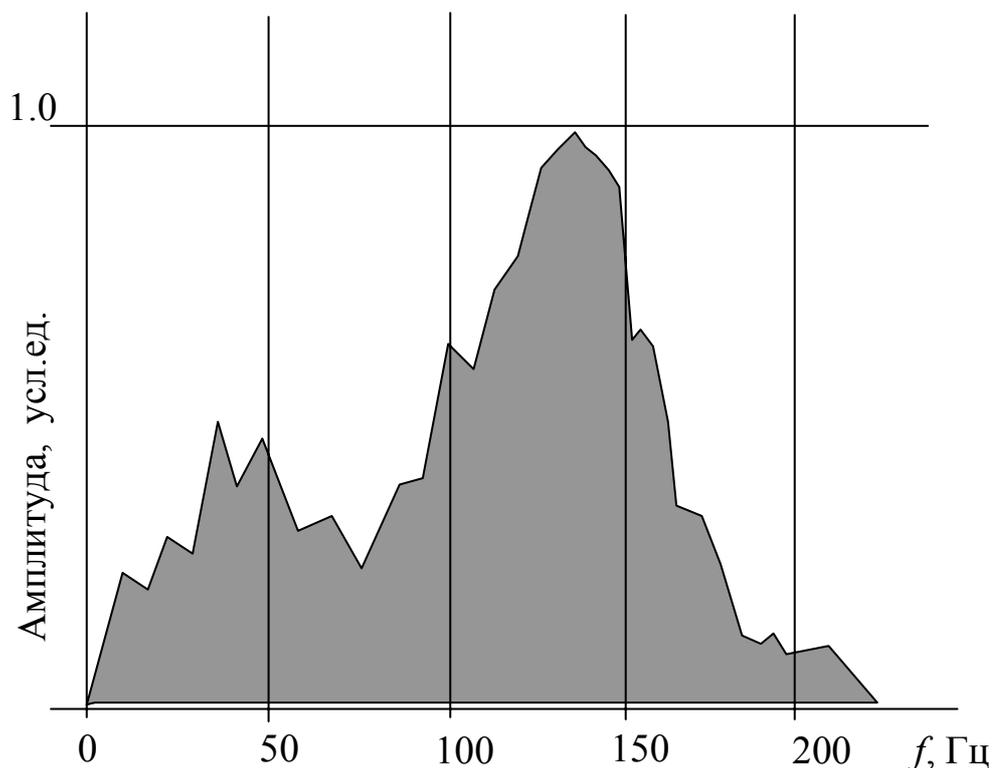


Рис. 8. Расчетная спектральная характеристика регистрируемого волнового поля. Случай, когда УГВ располагается на верхней границе песков

В данном случае по слою влажного песка, как и в предыдущем случае, распространяются головные волны, имеющие значительную амплитуду. Однако за счет того, что обводненный слой песка имеет мощность всего 5 м, прослеживаются и головные волны, распространяющиеся по глинам. Спектральная характеристика волнового поля в данном случае подобна той, что наблюдалась в случае, когда весь песок был увлажнен.

Подобные расчеты были проведены на моделях оползнеопасных участков побережья Азовского моря вблизи пос. Мелекино, на западной окраине г. Мариуполь, на оползнеопасном участке ДПУ («Артек»). Результаты проведенных исследований практически не отличаются от описанных выше. Кроме того, расчеты показывают, что в некоторых случаях насыщение пород водой приводит к некоторому увеличению частоты максимума спектра волны, отраженной от УГВ (на 10-15 Гц).

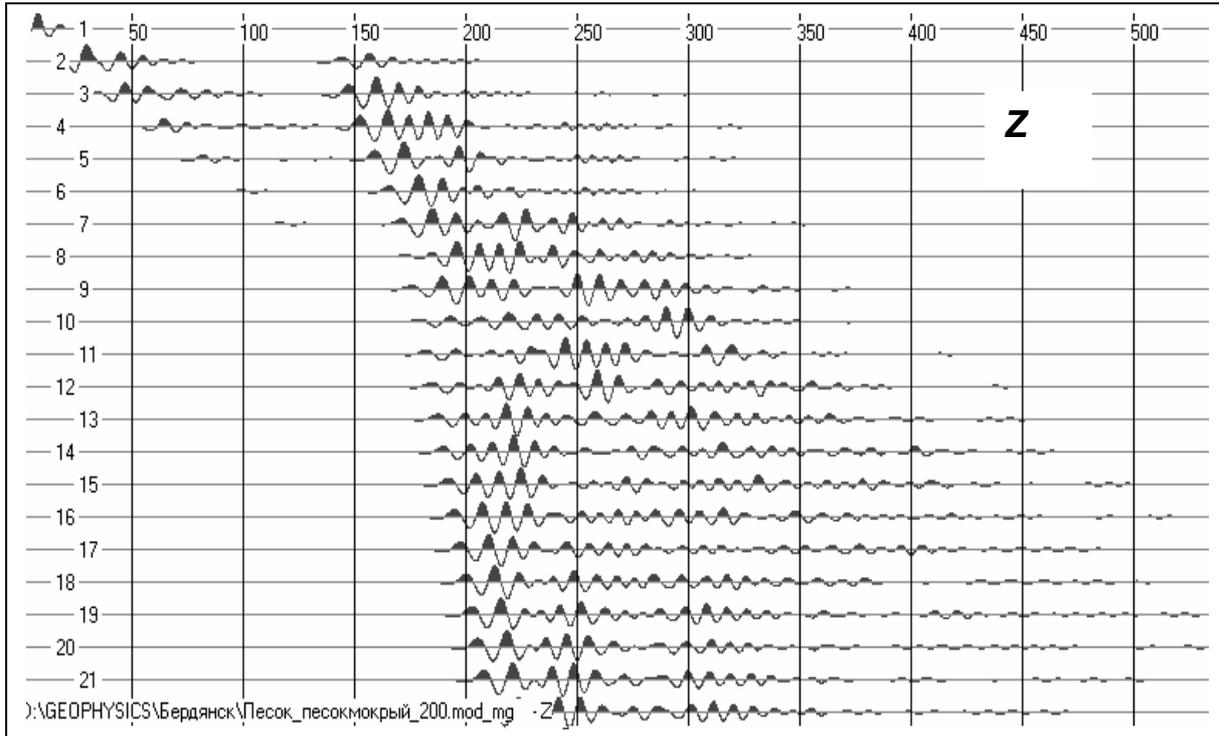


Рис. 9. Набор теоретических сейсмограмм. Песок увлажнен до уровня половины его мощности

Таким образом, математическое моделирование позволяет выбрать оптимальные условия проведения сейсмоакустических наблюдений. Анализ результатов теоретических расчетов показывает:

- для выявления расположения УГВ сейсмическим методом целесообразно использовать источники сейсмических колебаний с рабочей частотой в диапазоне 100 – 150 Гц;
- на УГВ формируется отраженная волна, которая в данном диапазоне частот имеет амплитуду, достаточную для ее регистрации и обработки.

Зная расположение пластов глин (например, по данным бурения) и определив расположение отражающей границы, таким образом можно оценить расположение УГВ с точностью 2-5 м.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Золотарев Г.С., Осиюк В.А., Роот П.Э. и др. Инженерная защита территорий и объектов от опасных геологических процессов. - М.: АО "Геоинформмарк". - 1994. - 70 с.
2. М.Г.Демчишин, О.О. Дударенко, Л.В. Самойленко, С.Б. Шехунова. Основні напрями вдосконалення інженерного захисту територій, будинків та споруд Научно-технический журнал "Екологія довкілля та безпека життєдіяльності". 5-6 2002.
3. Kelly K.R., Ward R.W., Treitel S., Alford R.M. Synthetic Seismograms, a finite-difference approach. - Geophysics, 1976. 41, p. 2-27.
4. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Теория и методы: Пер. с англ. - М.: Мир, 1983. - Т. 2. - 360 с.