

УДК 551.5.001.57:550.834.5

© В.В. Романов

В.В. Романов

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ АНАЛИЗЕ ДАННЫХ МЕТОДА ОТРАЖЕННЫХ ВОЛН В ИНЖЕНЕРНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ

В инженерной сейсмозонировке изучается строение, состав и состояние грунтов верхней части геологического разреза (ВЧР). Инженерная сейсмозонировка является частью инженерно-геофизических изысканий при проектировании, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений. Сейсмозонировка в инженерно-геологических изысканиях активно применяется с 70-х годов XX века. Использование инженерной сейсмозонировки позволяет увеличить объем информации о литологии и свойствах грунтов и многократно снизить затраты на буровые работы и лабораторные исследования.

На основании данных о скорости сейсмических волн и плотности рассчитываются упругие модули и другие физико-механические свойства грунтов в естественном залегании без отбора проб. В условиях городов, промышленных предприятий и путей сообщения мощные электромагнитные поля, твердое асфальтовое покрытие, развитая сеть подземных коммуникаций зачастую не позволяют применять никакие геофизические методы, кроме сейсмических.

Инженерная сейсмозонировка применяется при решении следующих геологических задач:

1. Картирование поверхности фундамента скальных пород под толщей дисперсных грунтов.
2. Выделение зон тектонических нарушений и разуплотнения грунтов.
3. Картирование кровли мерзлых грунтов.
4. Картирование уровня грунтовых вод.
5. Изучение и прогноз опасных геодинамических процессов – оползней и карстов.
6. Литологическое расчленение толщи дисперсных грунтов.
7. Определение физико-механических свойств грунтов.
8. Сейсмическое микрорайонирование (СМР).

Использование сейсмических методов для инженерно-геологических изысканий весьма специфично. Для реализации геофизических работ на промышленных площадках и линейных объектах применяются весьма плотные сети наблюдений,

мобильные измерительные приборы, слабые источники поля, а также большое внимание уделяется борьбе с техногенными помехами и влиянием приповерхностных неоднородностей.

В инженерной сейсмозонировке метод отраженных волн (МОВ) применяются сравнительно недавно, в основном из-за трудностей, связанных с выделением гиперболических осей синфазности в области последующих вступлений. Отраженные волны имеют незначительные амплитуды, наблюдаются на фоне множества случайных и регулярных помех (рис. 1).

В отличие от преломленных волн, отраженные волны не перемещаются вдоль границы, а сразу возвращаются на поверхность. Поэтому информация, заключенная в импульсе отраженной волны, характеризует только небольшую область вблизи точки образования отраженной волны. Минимальный размер этой области равен радиусу зоны Френеля, с увеличением наклона границы он возрастает.

Границы, построенные по данным метода отраженных волн (МОВ), из-за рассеивания на шероховатостях редко бывают устойчивыми и их корреляция вызывает значительные затруднения. Однако совершенствование технических средств сейсмозонировки, разработка новых способов обработки, усложнение систем наблюдений позволили внедрить МОВ в инженерную сейсмозонировку.

Использование метода отраженных волн имеет ряд несомненных преимуществ. Среди них:

1. Высокая глубинность 20-150 м даже на расстояниях небольшой длины.
2. Хорошая разрешающая способность при выделении локальных неоднородностей.
3. Возможность выделения границ слоев как с повышенными, так и с пониженными значениями упругих свойств.
4. Работа на мерзлом грунте, асфальте или бетоне не вызывает никаких затруднений, более того, твердая поверхность благоприятна для возбуждения упругих волн.

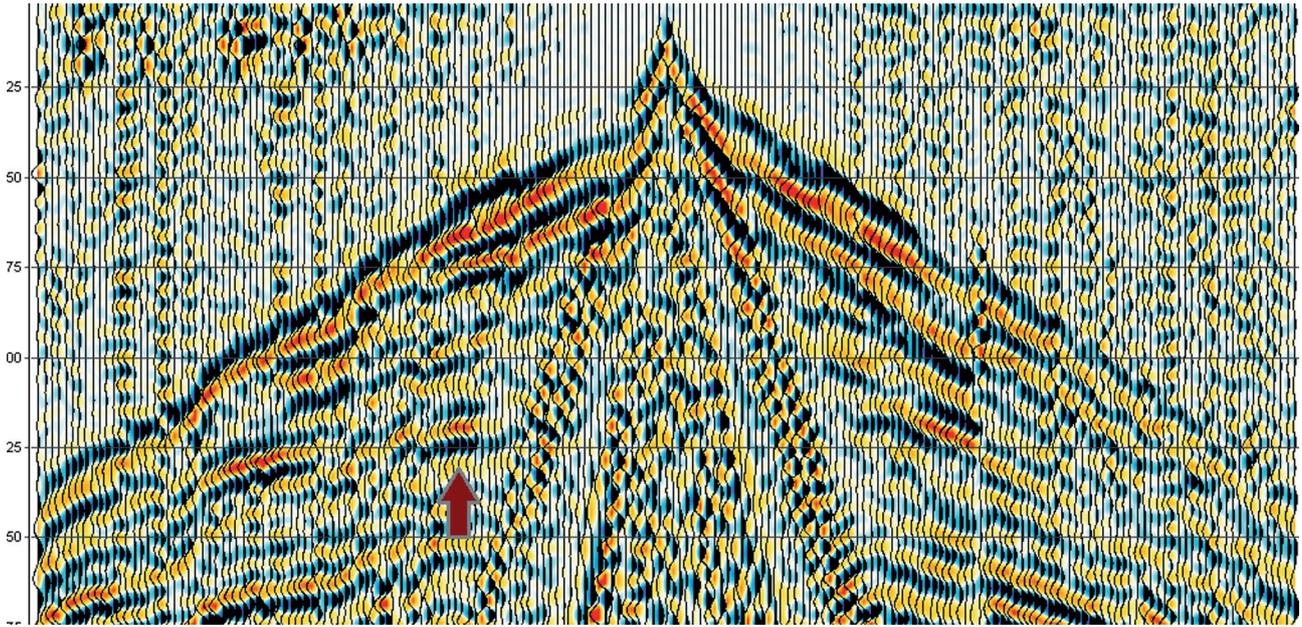


Рис. 1. Сейсмограмма МОВ (Подмосковье). Схема наблюдений Z-Z, стрелкой показана ось отраженной волны

Перечисленные преимущества особенно актуальны при изучении границ на глубинах более 15 метров, где использование волн первых вступлений (преломленных, рефрагированных и т.д.) вызывает значительные затруднения. Особенно перспективным выглядит применение МОВ на поперечных волнах. В благоприятных условиях в разрезе выделяются 5-6 сейсмогеологических слоев различного литологического состава (рис. 2).

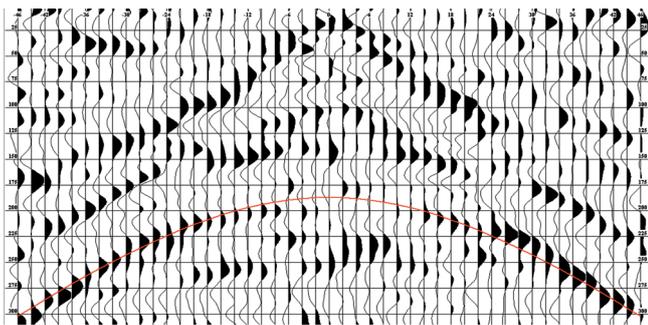


Рис. 2. Сейсмограмма МОВ (Калужская область, Y-Y). Линией выделена отраженная волна

Проблема выделения слабых отраженных волн на фоне мешающих колебаний решается автоматизированной обработкой данных метода по технологии суммирования сейсмических трасс, сгруппированных по общей средней точке (ОСТ). Перед суммированием сейсмические данные предварительно фильтруются и выравниваются по амплитуде, оси синфазности отраженных волн распрямляются для обеспечения синфазного сложения импульсов. Обработанные данные представляются в виде динамических глубинных разрезов (рис. 3).

В многослойных средах отраженные волны формируют сложное волновое поле, содержащее значительное число кратных волн. Выделение полезных волн, отраженных от целевых геологических границ, в таких условиях становится затруднительным. Анализ сейсмограмм метода отраженных волн значительно облегчается при использовании модельных синтетических сейсмограмм. Для расчета модельной сейсмограммы импульсы с заданной частотой и формой как бы «нанизываются» на расчетные годографы и изображаются в стандартном для сейсморазведки виде. Моделирование помогает выделить полезные волны в сложном волновом поле, оценить возможности сейсмического метода на объекте с заданными физико-геологическими свойствами, оценить влияние волн-помех.

Для расчета модельной сейсмограммы необходима точная или приближенная информация о количестве относительно однородных сейсмогеологических слоев в изучаемом разрезе, мощности и упругих свойствах слоев – скоростей продольных и поперечных волн, а также плотности. Указанные данные объединяются в табличной форме, образуя петрофизическую модель. Информация, содержащаяся в петрофизической модели, используется для расчета годографов отраженных волн и определения их динамических свойств, в первую очередь относительной амплитуды.

В качестве примера рассмотрим обобщенную модель верхней части разреза, характерную для Восточно-Европейской платформы. Кровля карбонатных пород верхнекаменноугольного возраста S_3 перекрыта дисперсными грунтами различного генезиса и возраста – флювиогляциальными песками

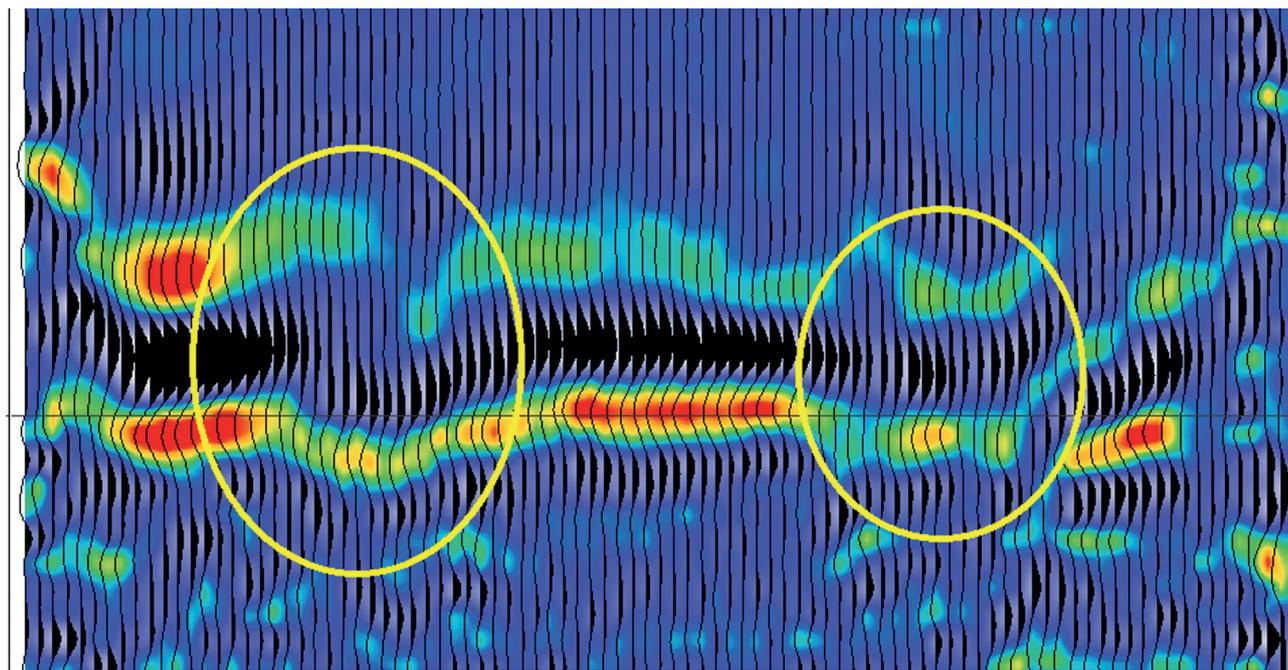


Рис. 3. Выделение карстовых проявлений сейсморазведкой МОВ (Нижний Новгород, Z-Z). Локальные изменения отражающей границы выделены кружками

среднего плейстоцена fQ_{II} и покровными суглинками верхнего плейстоцена prQ_{III} . В покровных суглинках проходит уровень грунтовых волн, что приводит к скачкообразному увеличению скорости продольной волны, тогда как скорость поперечной волны от водонасыщения не зависит. Во флювиогляциальных песках скорость обоих типов волн уменьшается, а в карбонатных породах снова увеличивается. Плотность грунтов коррелируется со скоростью поперечных волн (табл. 1, рис. 4).

Годографы отраженных волн с удовлетворительной для предварительного анализа точностью вычисляются на основании выражения:

$$t(x) = \sqrt{t_0^2 + \frac{x^2}{V^2}}. \quad (1)$$

Время нормального отражения t_0 в формуле (1) находится при помощи выражения:

$$t_0^m = \sum_{k=1}^m \frac{h_k}{V_k}. \quad (2)$$

Величина эффективной скорости рассчитывается как

$$V_m = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m h_k V_k}{\sum_{k=1}^m \frac{h_k}{V_k}}}. \quad (3)$$

Амплитуды отраженных волн определяются как произведение коэффициентов отражения и прохождения:

$$A_m = \frac{\rho_m V_m - \rho_{m+1} V_{m+1}}{\rho_m V_m + \rho_{m+1} V_{m+1}} \prod_{k=1}^{m-1} 1 - \left(\frac{\rho_k V_k - \rho_{k+1} V_{k+1}}{\rho_k V_k + \rho_{k+1} V_{k+1}} \right)^2. \quad (4)$$

Влияние поглощения и расхождения на амплитуду не рассматривается, так как предполагается, что эти факторы полностью устраняются процедурой выравнивания амплитуд. Результаты расчетов по отраженным продольным волнам представлены в табл. 2.

Таблица 1

Петрофизическая модель верхней части разреза

Слой	Состав, возраст	h, м	V_p , м/с	V_s , м/с	ρ , г/см ³
1	prQ_{III} суглинки не полностью водонасыщенные	5	400	220	1,6
2	prQ_{III} суглинки полностью водонасыщенные	10	1900	220	1,8
3	fQ_{II} пески	10	1600	180	1,7
4	C_3 , известняки	∞	2300	1100	2,3

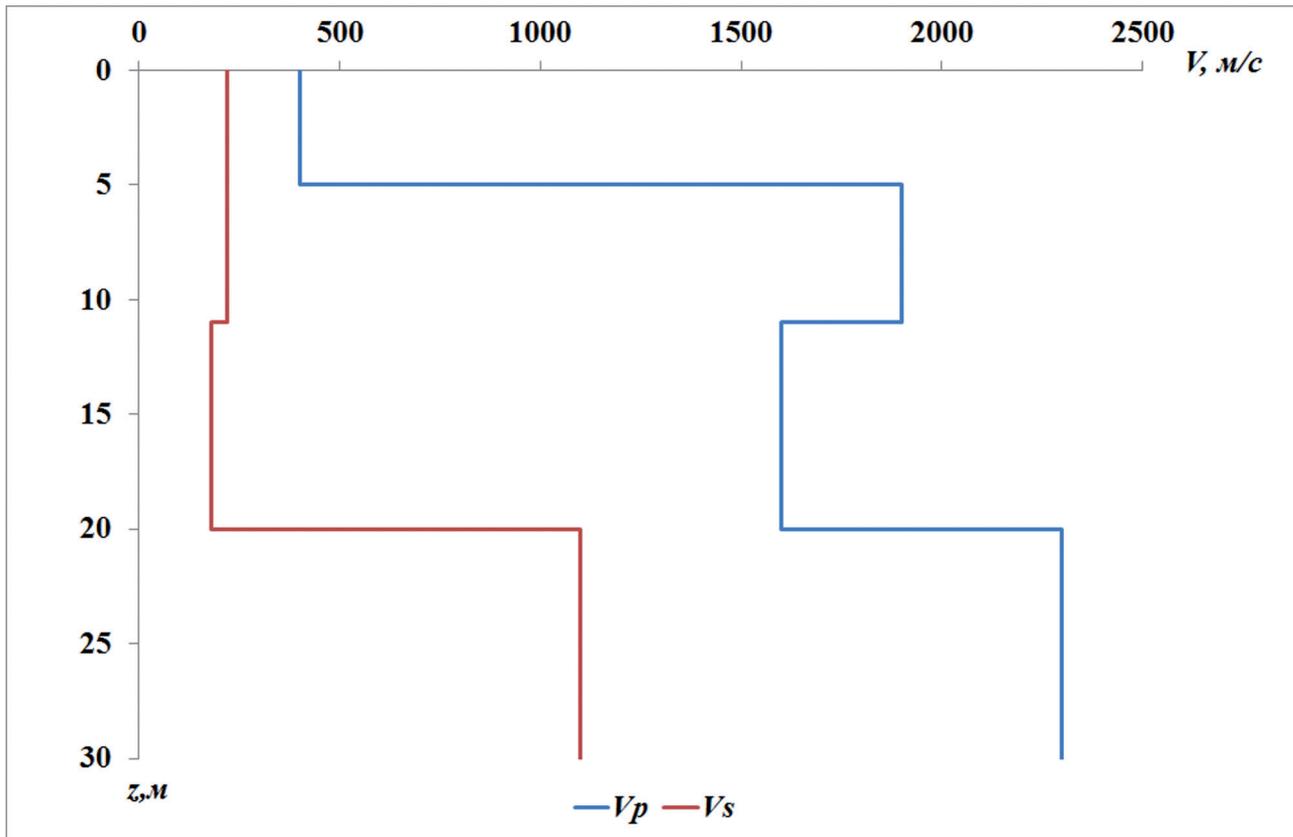


Рис. 4. Скоростные колонки по продольным и поперечным волнам

Данные табл. 2 показывают, что отраженная волна от границы 1 характеризуется крайне низкой эффективной скоростью и существенным наклоном годографа. В целом эффективная скорость увеличивается с возрастанием времени нормального отражения, несмотря на то, что слой флювиогляциальных песков имеет меньшую скорость продольных волн. Амплитуда волны, отраженной от уровня грунтовых вод, примерно в два раза превышает амплитуды двух других волн, отражения от второй и третьей границы находятся в противофазе. Незначительные временные интервалы между отражениями (10-15 мс) отрицательно сказываются на разрешающей способности метода отраженных волн.

Модель, представленная в табл. 1, была использована для расчета синтетических сейсмограмм отраженных продольных волн с частотой импульса 50, 100 и 150 Гц. Они представлены на рис 5, 6 и 7 соответственно.

Из-за значительной кривизны годограф волны, отраженной от границы грунтовых вод I, практически не воспринимается как гиперболический. Область сейсмограммы, где выделяется волна I, традиционно «занята» колебаниями поверхностных волн, поэтому указанная граница на разрезах проявляться не будет. Отражения от границ II и III раздельно прослеживаются только при преобладающей частоте колебаний более 100 Гц, что в практике сейсморазведки встречается достаточно редко. Нижнюю часть модельной

Таблица 2

Результаты расчетов кинематических и динамических параметров по продольным отраженным волнам

Граница	$t_0, \text{мс}$	$V, \text{м/с}$	A
1	25	400	-0,68
2	36	1090	+0,29
3	48	1240	-0,27

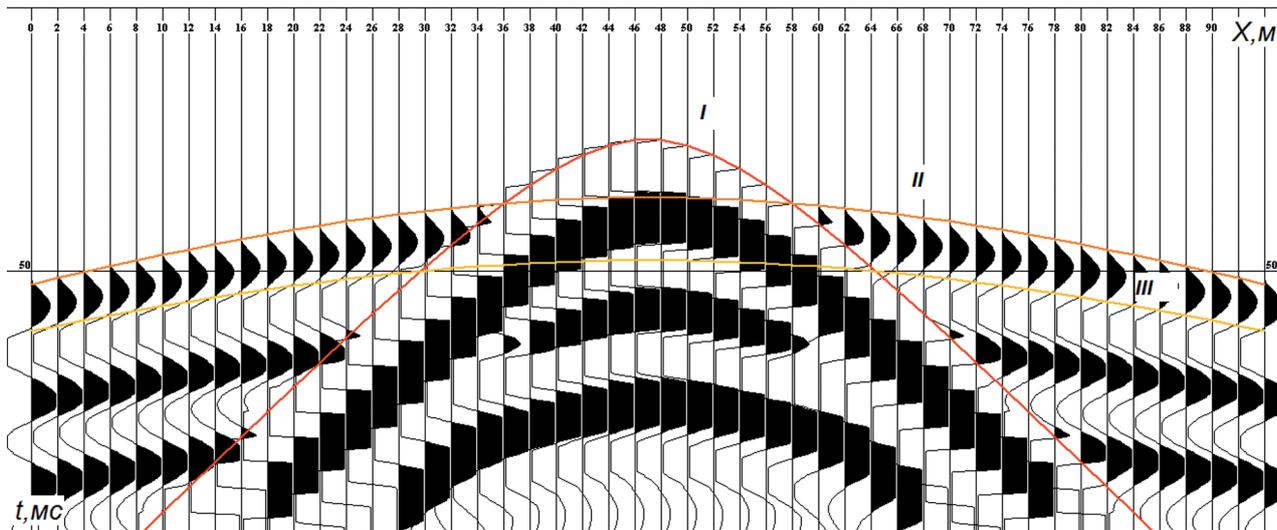


Рис. 5. Синтетическая сейсмограмма по продольным отраженным волнам. Частота импульса 50 Гц. Символами I, II и III обозначены полезные волны

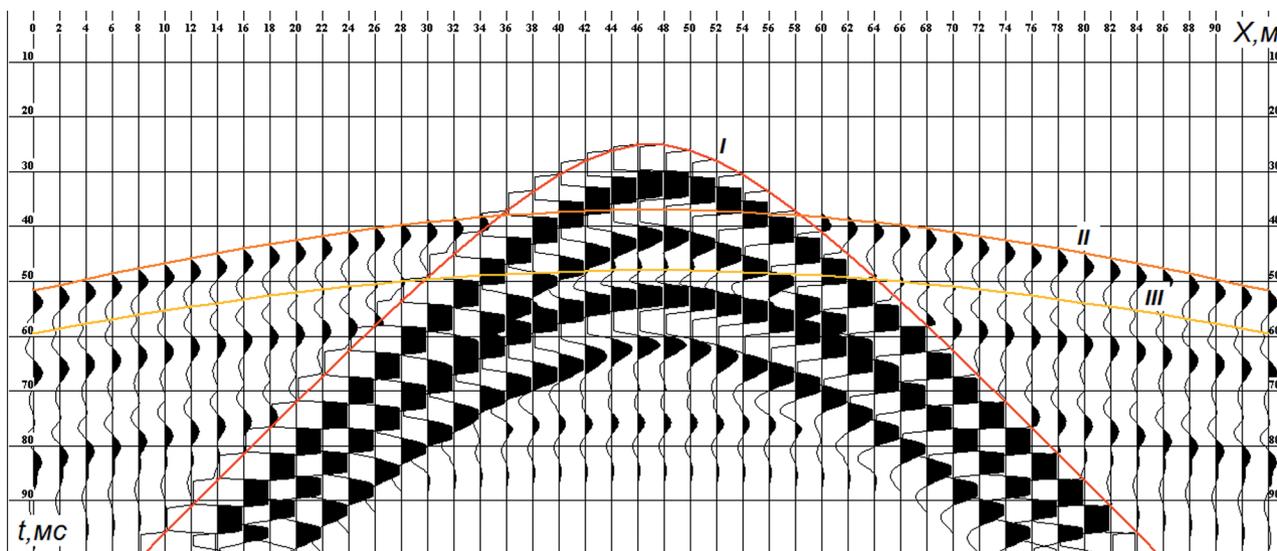


Рис. 6. Синтетическая сейсмограмма по продольным отраженным волнам. Частота импульса 100 Гц. Символами I, II и III обозначены полезные волны

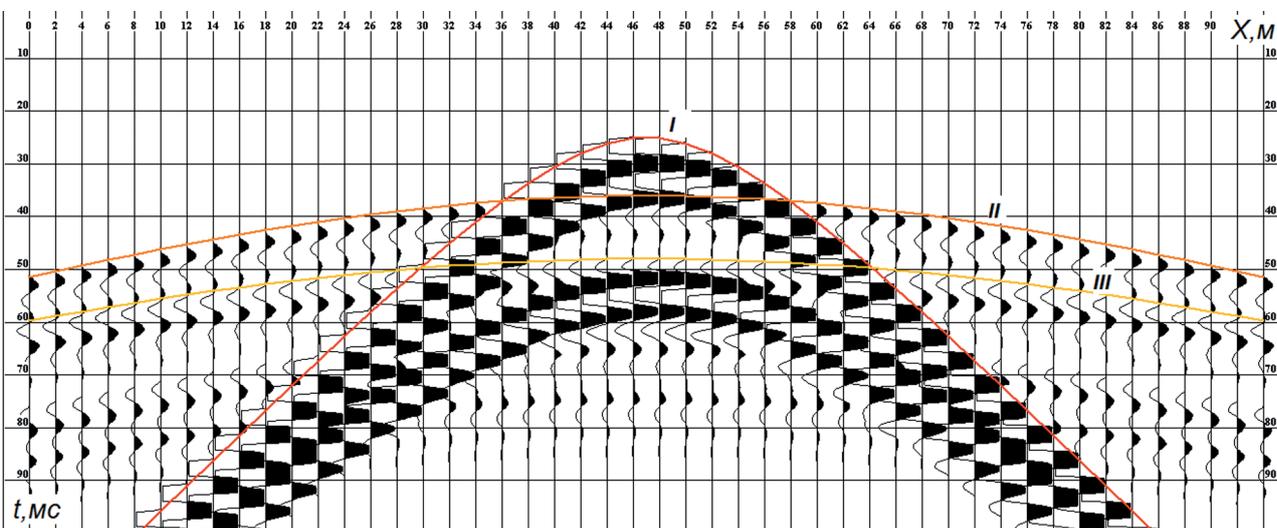


Рис. 7. Синтетическая сейсмограмма по продольным отраженным волнам. Частота импульса 150 Гц. Символами I, II и III обозначены полезные волны

сейсмограммы занимают кратные волны, однако они не мешают выделению полезных отраженных волн.

Использование поперечных волн более предпочтительно в плане раздельного наблюдения отражающих границ даже при условии пониженной частоты записи в целом. На рис. 8 изображена модельная сейсмограмма с записью поперечных отраженных волн.

Отражение *I* от уровня грунтовых волн теоретически будет наблюдаться на реальных сейсмограммах, так как с увеличением водонасыщенности возрастает и плотность грунта. Между отражением *II* от кровли флювиогляциальных песков и кратным отраженным волнами от уровня грунтовых волн на удалениях в 30-50 м наблюдается значительная интерференция. Отраженная волна *III*, связанная с кровлей карбонатных, выделяется надежно практически на любых частотах импульса. В целом использование поперечных волн для метода отраженных волн предпочтительней в первую очередь из-за лучшей разрешенности записей. Однако с ростом числа контрастных отражающих границ возрастает и число кратных волн, что необходимо учитывать при обработке данных и анализе полевых сейсмограмм.

Выводы

1. Математическое моделирование необходимо при анализе полевых сейсмограмм метода отраженных волн, особенно при большом числе отражающих границ и кратных волн.

2. Результаты моделирования дают ценную информацию об ожидаемой структуре сейсмограммы и позволяют оценить перспективы применения сейсморазведки на конкретном объекте
3. Продольные отраженные волны из-за значительного возрастания скорости в полностью водонасыщенных грунтах характеризуются меньшей разрешающей способностью, чем поперечные в тех же условиях
4. Сейсмограммы поперечных отраженных волн содержат большое количество кратных волн, выявление которых возможно на модельных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Республиканские строительные нормы. Технические требования к производству геофизических работ. Сейсморазведка : РСН 66-87 : утв. Госстроем РСФСР 31.07.87 : взамен РСН 45-77: дата введения 01.01.88.
2. 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.
3. Горяинов Н.Н. Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии. – М. : Недра, 1992. – 264 с.

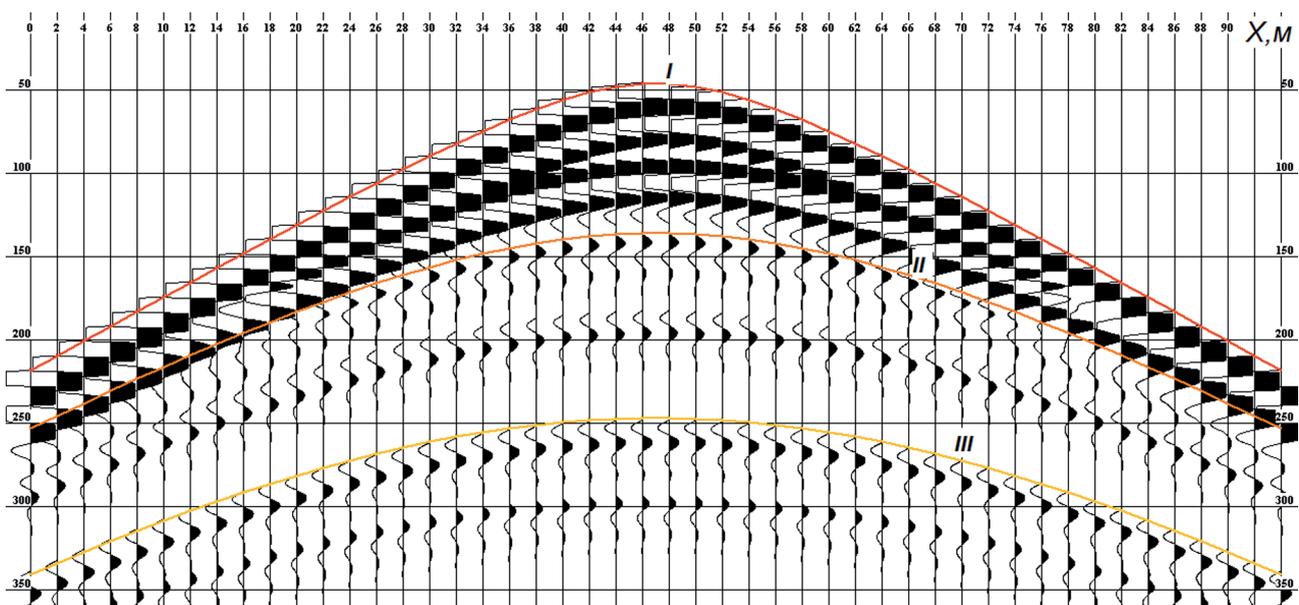


Рис. 8. Синтетическая сейсмограмма по опер отраженным волнам. Частота импульса 50 Гц. Символами *I*, *II* и *III* обозначены полезные волны