

Влияние приповерхностного высокоскоростного слоя на динамические и кинематические свойства отражённых волн

■ Романов В.В., РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва

Статья посвящена проблеме влияния приповерхностного высокоскоростного слоя на свойства волнового поля инженерной сейсморазведки МОВ-ОСТ. Рассматриваются такие эффекты, как изменение амплитуд и скоростей полезных и кратных отраженных волн в зависимости от наличия и мощности приповерхностного высоко-скоростного слоя.

Введение

При исследованиях верхней части разреза в инженерной сейсморазведке часто приходится иметь дело с маломощным приповерхностным слоем с аномально высокой скоростью распространения упругих волн. Им может быть слой сезонного промерзания, а также бетонное, асфальтовое или иное твёрдое техногенное покрытие [2]. За счет такого **приповерхностного высокоскоростного слоя** (ПВС) формируется инверсный разрез [11]. Как правило, мощность ПВС невелика — от 0,1 до 2,0 м, скорость продольных волн в нём составляет 2000–3000 м/с, поперечных — 800–1500 м/с волн [12]. Наибольшей «популярностью» в инженерной сейсморазведке МОВ-ОСТ пользуются горизонтально-поляризованные поперечные волны SH, так на отражающих границах их тип не изменяется, что делает наблюдаемое волновое поле более простым [3].

В нормальных(неинверсных) разрезах приповерхностная грунтовая толща характеризуется положительным вертикальным градиентом скорости, поэтому существенная часть сейсмограмм, полученных по схеме наблюдений $Y-Y$ [3], занята диспергирующими поверхностными волнами Лява. Эти волны образуются в приповерхностном слое конечной толщины, где происходит конструктивная интерференция объёмных SH волн. Значение вертикального градиента определяет диапазон фазовых скоростей

цуга волн Лява, поэтому уменьшение градиента положительно сказывается на прослеживании отражённых волн, особенно от неглубоких границ.

Структура поля поперечных SH волн существенно изменяется в инверсных разрезах. Если толщина приповерхностного слоя стремится к нулю, увеличивается до бесконечности или он является высокоскоростным, то волны Лява исчезают. Вместо этого в первых вступлениях наблюдается прямая волна со скоростью ПВС, а в последующих — отражённые SH волны, образованные проходящей однородной волной, сформировавшейся в подошве ПВС [4].

Несмотря на явные преимущества выполнения инженерной сейсморазведки в инверсных разрезах, рассмотренные в работах [7–9] существует и отрицательное влияние [2]. В работе поставлена цель осветить влияние ПВС на свойства последующих полезных и мешающих отражений.

Физико-геологическое моделирование

В качестве примере рассмотрим выполнение инженерной сейсморазведки МОВ-ОГТ на набережной реки Яузы, в центре Москвы. Физико-геологическая модель ВЧР здесь представлена четвертичными, юрскими и верхне-каменноугольными отложениями различного состава (Таблица 1). Наличие в разрезе аллювиально-болотных отложений приурочено к руслу малой реки Синички,

левого притока Яузы, ныне заключённой в подземный коллектор. В XIX веке речка была запружена, рядом располагались Летний военный госпиталь (сейчас детский сад 2617), Госпитальный мост, мельница и Католическое немецкое (сейчас Введенское) кладбище. Скорости и плотности для таблицы были выбраны по данным публикаций [6] [10].

В каменноугольных породах верхнего карбона встречаются зоны дезинтеграции, сложенные обломками известняков и доломитов и известковой мукой (слои 5 и 10 модели), сформированные в результате карстопроявления [5]. Кроме того, среди известняков встречаются пласты глин и мергелей, характеризующихся пониженными сейсмическими и плот-

▼ Табл. 1.

№	Состав, генезис, возраст	h , м	H , м	V_s , м/с	ρ , г/см ³
1	tQ_{IV} — техногенные насыпные пески, строительный мусор, голоцен	5	5	250	1,90
2	abQ_{IV} — аллювиально-болотные глины серо-коричневая, пластичные, иловатые, с прослоями торфа, голоцен	2	7	350	2,05
3	aQ_{III-IV} — аллювиальные пески средней крупности, серо-коричневые, рыхлые, водонасыщенные, верхний неоплейстоцен-голоцен	1	8	450	2,10
4	$J_{2-3\text{ vd-er}}$ — глины чёрные и голубовато-серые, полутвёрдые, великодворской и ермолинской свит оксфордского и келловейского ярусов	6	14	500	2,05
5	eC_{3tr2} — серые известняки, разрушенные до щебня, верхней пачки трошковской свиты дорогомилловской серии касимовского яруса верхнего карбона	2	16	800	2,30
6	C_{3tr2} — красные глины, верхней пачки трошковской свиты дорогомилловской серии касимовского яруса верхнего карбона	4	20	600	2,10
7	C_{3tr2} — серые известняки, трещиноватые, верхней пачки трошковской свиты дорогомилловской серии касимовского яруса верхнего карбона	1	21	1200	2,40
8	C_{3tr2} — красные глины, верхней пачки трошковской свиты дорогомилловской серии касимовского яруса верхнего карбона	5	26	600	2,10
9	C_{3tr1} — светло-серые известняки, трещиноватые, нижней пачки трошковской свиты дорогомилловской серии касимовского яруса верхнего карбона	4	30	1200	2,40
10	eC_{3tr1} — светло-серые известняки, разрушенные до щебня, нижней пачки трошковской свиты дорогомилловской серии касимовского яруса верхнего карбона	1	31	800	2,30
11	C_{3nv} — красные твёрдые глины, неверовской свиты хамовнической серии касимовского яруса верхнего карбона	8	39	600	2,10
12	C_{3nv} — голубовато-серые мергели, неверовской свиты хамовнической серии касимовского яруса верхнего карбона	---		700	2,20

ностными свойствами — слои 6, 8, 11 и 12. Рассматриваемая модель отражает основные особенности геологического разреза Московского региона — двухтрёхслойное строение толщи над скальным основанием, а также наличие зон пониженной скорости в толще скальных пород.

В рамках предложенной модели рассмотрено существование однократно и двукратно-отражённых волн, для которых по известным формулам были вычислены: время нормального отражения t_0 , амплитуда S , предельная эффективная и средняя скорости. Для расчета амплитуд учитывались такие факторы, как геометрическое расхождение (показатель степени — 1), эффективное поглощение (частотнезависимый декремент u — 0,10), отражение и прохождение [1]. Модель была рассмотрена в трёх вариантах — первоначальном (модификация А), с ПВС мощностью 0,5 м (модификация В) и ПВС мощностью 2 м (модификация С). Скорость поперечных волн в ПВС была выбрана 1200 м/с. Также по моделям были вычислены синтетические сейсмограммы с использованием импульса Берлаге (параметр затухания $\alpha=2,5$, преобладающая частота $f=35$ Гц; $n=1$) (1).

$$u(t) = t^n \cdot e^{-\beta t} \cdot \sin 2\pi f t \quad (1)$$

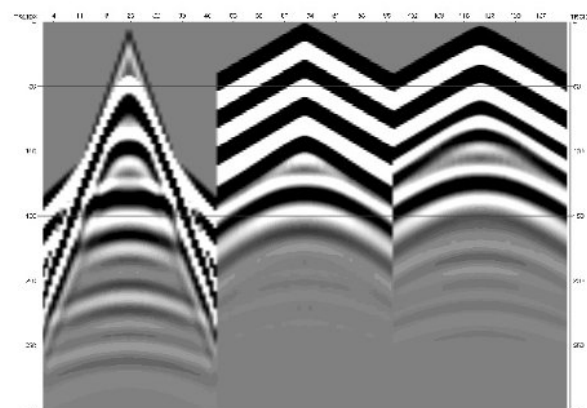
Полученные результаты

Синтетические сейсмограммы

На синтетических сейсмограммах отчётливо видно, как влияние ПВС вызывает выполаживание годографов всех отражённых волн и рост амплитуд кратных отражений в верхней части записи (Рис. 1).

Кинематические параметры

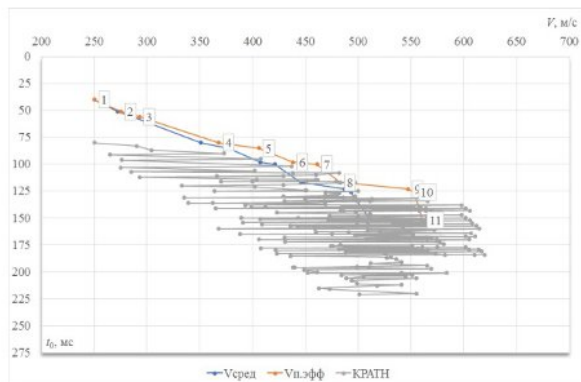
На рис. 2 представлены скоростные законы для упомянутых выше модификаций. Особое внимание следует обратить на различия средних и предельных



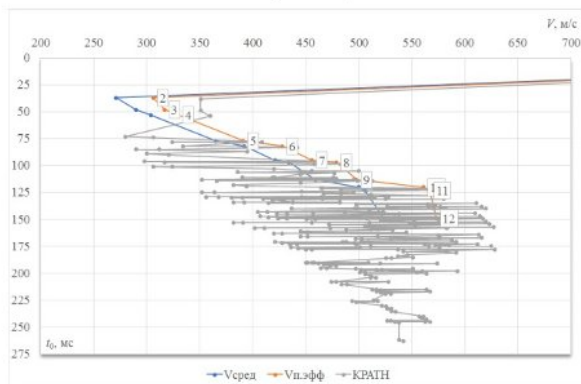
▲ Рис. 1. Синтетические сейсмограммы с осями синфазности однократных и двукратно-отражённых волн. Слева — направо: модификации А, В и С. По вертикальной оси — время вступления, мс.

эффективных скоростей. Первые применяются при вычислении глубинного разреза, вторые — приближенно определяются в результате скоростного анализа по сейсмограммам ОСТ. Использование предельных эффективных скоростей вместо средних приводит к систематическому завышению глубин отражающих границ, поэтому оценка различия между ними представляет практический интерес.

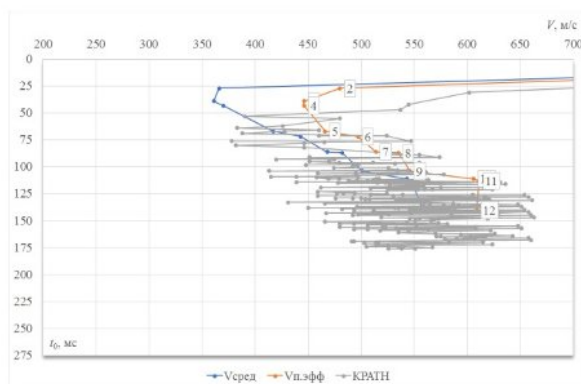
Можно заметить, что для модификации А различие предельной эффективной и средней скоростей с увеличением t_0 растёт, достигая 10 % (50 м/с) к кровле неверовских мергелей ($H=39$ м; $t_0=149$ мс). При наличии ПВС (модификации В и С) различие предельной и средней скорости вначале убывает, а потом начинает возрастать, причём с увеличением мощность ПВС эта тенденция проявляется ярче. Например, предельная эффективная скорость для предполагаемого отражения от кровли аллювиально-болотных песков ($H=7$ м; $t_0=27$ мс) в модификации С на 30 % (114 м/с) больше средней. Сами предельные эффективные скорости в инверсных разрезах возрастают на 10–200 м/с, с увеличением



Модификация А



Модификация В



Модификация С

▲ **Рис. 2. Скоростные законы.**
V_{сред} — средняя скорость однократных отражений, *V_{п.эфф}* — предельная эффективная скорость однократных отражений, *КРАТН* — предельная эффективная скорость двукратных волн. Цифрами показаны номера отражающих границ.

глубины отражающих границ различие уменьшается, то есть наибольшие отклонения наблюдаются в приповерхностной части разреза. Уровень искажений, которые вносит ПВС в предельные

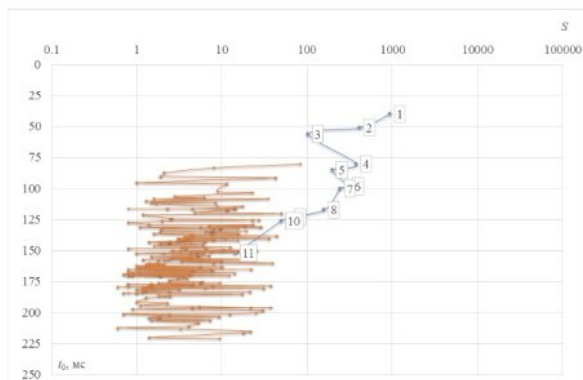
эффективные скорости прямо зависит от мощности слоя. При достаточно мощных ($>0,5$ м) ПВС в верхней части скоростного закона наблюдаются протяжённые участки, где предельная эффективная скорость однократных отражённых волн существенно завышена и быстро убывает с ростом t_0 .

Поверхностный высокоскоростной слой также влияет на распределение скоростей кратных волн. При скоростном анализе принято считать, что полезные отражения имеют большие фиктивные скорости, чем кратные. В нормальном разрезе большинство кратных волн действительно характеризуются меньшей предельной эффективной скоростью, что облегчает процесс их выделения на вертикальном спектре скоростей. На фоне большого количества высокоскоростных кратных волн выделяются лишь отражения от относительно глубоких границ в известняках верхнего карбона выделяются на фоне кратных с сопоставимыми скоростями.

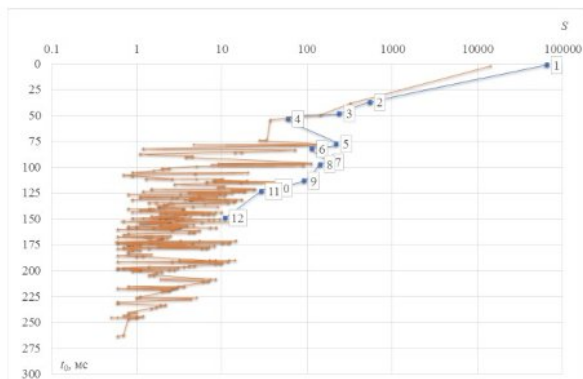
В модификации В частично кратные волны до времени 50 мс имеют предельные эффективные скорости больше чем у полезных волн. Все эти кратные волны формируются в подошве приповерхностного высокоскоростного слоя. Также высокоскоростные кратные волны наблюдаются вблизи отражений от более глубоких границ. В модификации С большинство кратных волн имеют повышенные скорости.

Динамические параметры

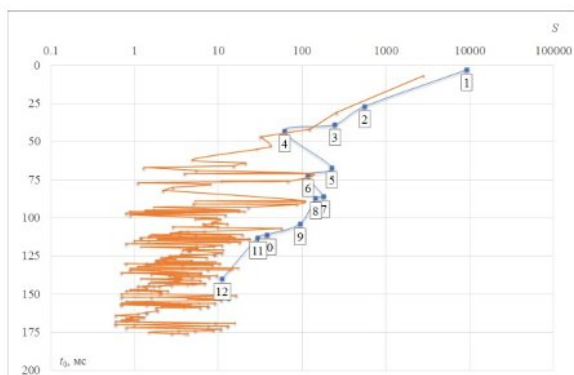
На рис. 3 представлены вычисленные амплитудные зависимости для полезных и кратных отражённых волн. В модификации А практически все кратные волны менее интенсивны, чем однократные отражённые волны в 10–100 раз. В модификации В уровень полезных отражений снижается, а кратных — возрастает, у всех полезных появляются высокоампли-



Модификация А



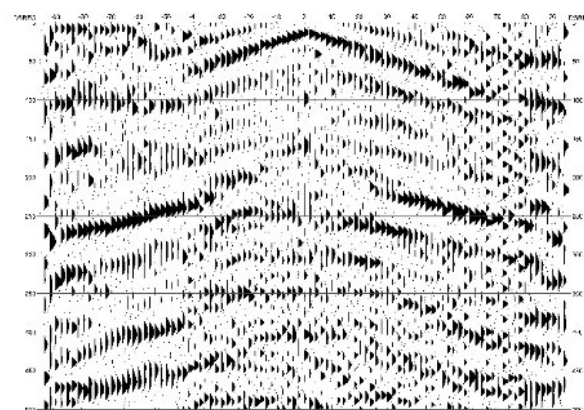
Модификация В



Модификация С

▲ Рис. 3. Амплитудные зависимости. Синей линией показана амплитудная зависимость однократных отражений, номера отражающих границ обозначены под соответствующими точками зависимости. Оранжевой линии изображена амплитудная зависимость кратных волн.

тудные волны-спутники. Отражение от подошвы в ПВС характеризуется амплитудой, значительно превышающей уровень всех остальных полезных отражённых волн. При переходе к модифика-



▲ Рис. 4. Полевая сейсмограмма МОВ. По вертикальной оси — время в мс, по горизонтальной — дистанция (хПП-хПВ), м.

ции С уровень отражения от ПВС снижается, другие амплитуды меняются незначительно, то есть влияние мощности ПВС на динамику последующих отражённых волн невелико.

В качестве доказательства полученных выводов, на рис. 4 представлена реальная полевая сейсмограмма, зафиксированная с сезонно-мёрзлого грунта толщиной около 2,8 м. Значительные амплитуды отражённых волн в интервале 0–50 мс не позволили отобразить прочие отражения без амплитудной регулировки. Множество практически параллельных осей синфазности с аномально низкой крутизной указывает на существенное влияние ПВС на структуру регистрируемого волнового поля.

Обсуждение результатов

Полученные результаты раскрывают преимущественно негативное влияние ПВС на скорости и амплитуды последующих отражений. Предельные эффективные скорости полезных отражённых волн искажаются сложным образом. В зависимости от толщины ПВС в верхней части скоростного закона выделяется зона, где предельная эффективная скорость убывает с ростом t_0 , чего не наблюдается в нормальных разрезах. Использование завышенных скоростей для расчёта глубинного разреза приведёт к система-

тическому завышению глубин отражающих горизонтов, а восстановленные пластовые скорости будут отличаться от истинных значений. Также влияние ПВС сказывается и на распределении предельных эффективных скоростей кратных волн. Оно проявляется в появлении высокоскоростных волн-спутников, затрудняющих интерпретацию вертикальных скоростных спектров. При наличии ПВС, независимо от его мощности, уменьшаются амплитуды целевых отражённых волн, снижается амплитудная разрешённость сейсмических изображений.

Выводы

Комплексный анализ результатов моделирования и оценки структуры полевых сейсмограмм позволил установить, что влияние ПВС на кинематику и динамику волновых полей МОВ-ОСТ негативно, несмотря на очевидный положительный эффект, заключающийся в исчезновении волн Лява. Устранение искажений, которое вносит этот слой в скорости полезных волн, а также подавление нежелательных кратных отражений, потребует особых подходов при скоростном анализе, оценке пластовых скоростей и вводе кинематических поправок.

Литература

1. Владов М. Л., Капустин В. В. О проблемах инженерной сейсморазведки // Технологии сейсморазведки. 2014. № 2. С. 104-112.
2. Гиодман А. Г., Гранит Б. А. Инженерно-геофизические исследования карста на территории Москвы и Московского региона методом многоволновой сейсморазведки // Вестник МГСУ. 2010. № 4-2. С. 120-127.
3. Заалишвили В. Б. Исследование сейсмических волн, возбуждаемых искусственными источниками // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2015. № 3. С. 21-32.
4. Кауфман А. А., Левшин А. Л. Введение в теорию геофизических методов. Часть 5. Акустические и упругие волновые поля в геофизике: Пер. с англ. А.В. Кирюшина, А.Е. Соловченко. - М.: ООО «Недра- Бизнес-центр», 2006. - 663 с: ил.
5. Кутепов В. М., Козлякова И. В., Анисимова Н. Г., Еремина О. Н., Кожевникова И. А. Оценка карстовой и карстово-суффозионной опасности в проекте крупномасштабного геологического картирования г. Москвы // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2011. № 3. С. 215-226.
6. Несынов В. В., Трифонов Б. А., Миндель И. Г. Опыт использования разночастотных методов сейсморазведки для изучения сейсмических характеристик грунтов // В сборнике: Сергеевские чтения. Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи Юбилейная конференция, посвященная 25-летию образования ИГЭ РАН. Ответственный редактор В.И. Осипов. 2016. С. 670-674.
7. Романов В. В. Математическое моделирование при анализе данных метода отражённых волн в инженерной сейсморазведке // Геоинформатика. 2014. № 1. С. 51-56.
8. Романов В. В. Из опыта комплексного применения сейсморазведки и георадиолокации при инженерно-геологических изысканиях на территории Москвы // Инженерные изыскания. 2015. № 5-6. С. 44-49.
9. Романов В. В., Шнеерсон М. Б. Инженерная сейсморазведка методом отраженных волн в Москве // Геофизика. 2018. № 6. С. 75-81.
10. Севостьянов В. В., Миндель И. Г., Трифонов Б. А., Рагозин Н. А. Геофизические методы в составе инженерно-геологических изысканий на территории мегаполисов // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2012. № 6. С. 497-506.
11. Скворцов А. Г., Царев А. М., Садуртдинов М. Р. Методические особенности изучения сейсмогеокриологического разреза // Криосфера Земли. - 2011. - Т. 15. - №. 4. - С. 110-113.
12. Турчков А. М. Метод отраженных волн в модификации общей глубинной точки в инженерной сейсморазведке // Seismic Technology. - 2013. - Т. 10. - №. 2