

Учёт влияния сезонно-мёрзлого слоя при инженерной сейсморазведке на поперечных отражённых волнах

- Романов В.В., Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, г. Москва.
- Посеренин А.И., Новиков П.В., Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, г. Москва.
- Кауркин М.Д., Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва.

Аннотация: В статье рассматривается способ учёта влияния сезонно-мёрзлого слоя на результаты метода отражённых поперечных волн.

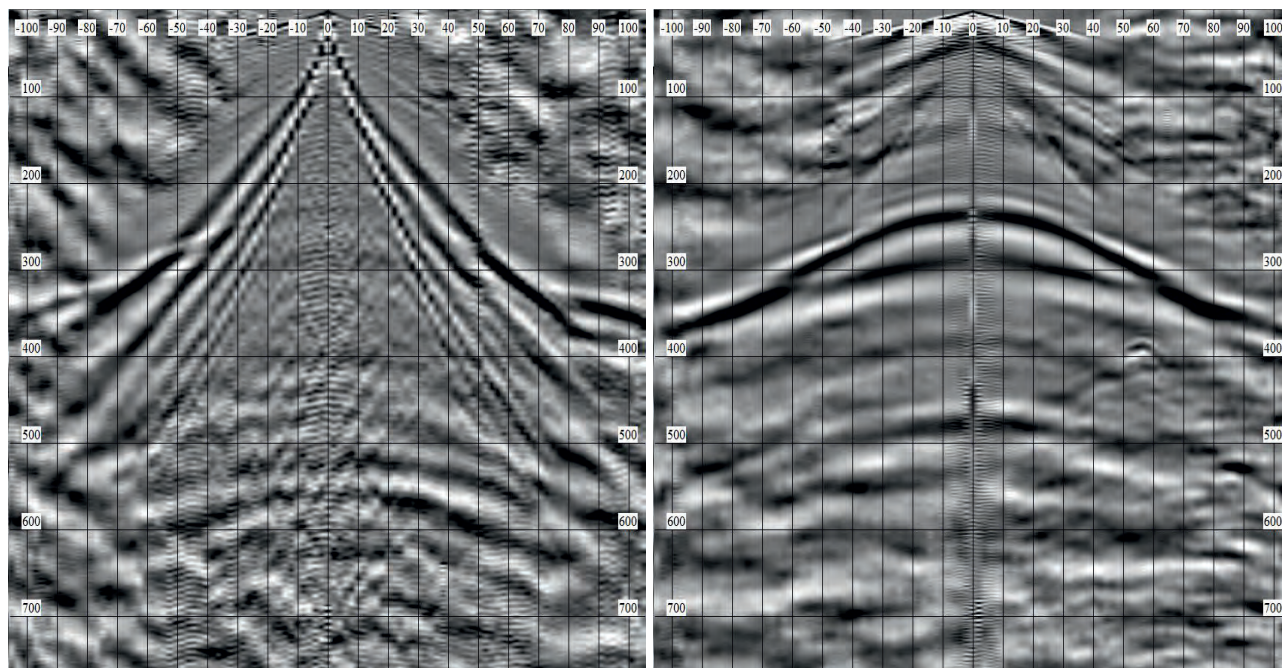
Ключевые слова: инженерная сейсморазведка, сезонно-мёрзлый слой, поперечные отражённые волны.

Введение

Основным препятствием для применения метода преломлённых волн и сейсмотомографии являются инверсные слои в скоростном разрезе, особенно если инверсия происходит на первой границе. Такая ситуация возникает, если первый слой — высокоскоростной, что делает разрез в целом поверхностно-экранирующим (ПЭР), то есть разновидностью частично-инверсных (ЧИР) [Скворцов и др., 1997]. Такие разрезы распространены в пределах простирающихся техносферы, где приповерхностный высокоскоростной слой (ПВС) имеет искусственное происхождение и сложен асфальтом, бетоном, гранитом и другими материалами жёсткого дорожного покрытия [Романов, Шнеерсон, 2018]. В регионах, где наблюдаются отрицательные температуры, верхняя часть грунтовой толщи промерзает, формируя сезонно-мёрзлый слой. Его физико-механические свойства отличаются от талого грунта такого же литологического состава. Сезонно-мёрзлый слой выделяется по повышенным скоростям продольных и поперечных волн и незначительному падению плотности. Глубина промерзания зависит от разновидности и влажности грунта, рельефа, амплитуды и длительности воздействия отрицательных температур, толщины снежного покрытия [Леонович и др., 2015].

На территории Российской Федерации максимальная глубина промерзания меняется от 80 до 240 см, в течение холодного времени года этот параметр меняется как систематически, так и случайным образом. Если полевая стадия сейсморазведки приходится на период существования сезонно-мёрзлого слоя, то нормальный скоростной разрез, обеспечивающий результативность методов преломлённых и рефрагированных волн, становится поверхностно-экранирующим [Криволапчук, Романов, 2019]. В этом случае единственной возможностью реализовать наземную сейсморазведку становится использование метода отражённых волн. Для образования отражённых волн не требуется положительный скачок скорости на границе или положительный градиент уравнения скоростного закона, что освобождает метод от влияния сезонного фактора [Романов, 2021].

Вместе с тем, прослеживанию отражающих границ на небольших глубинах (5–15 м) осложняют волны, доминирующие в последующих вступлениях — поверхностные, прямые, кратно-отражённые. Подавление последних на стадии обработки не всегда приводит к успеху, поэтому метод отражённых волн в инженерной сейсморазведке обычно реализуется на поперечных горизонталь-



▲ Рис. 1. Сейсмограммы МОВ (схема Y-Y), полученные вне области существования сезонно-мёрзлого слоя (слева) и на ней (справа).

но-поляризованных SH волнах, при возбуждении которых в поверхностно-экранирующих разрезах не образуются поверхностные волны Лява [Скворцов и др., 2017].

На рисунке 1 продемонстрированы две супер-сейсмограммы, полученные по профилям, отработанных в один день на одной объекте исследования. В первом случае профиль располагался вблизи стены сооружения, ускорившей процесс оттаивания сезонно-мёрзлого слоя, во втором — на расстоянии 5 м от неё. В нормальном скоростном разрезе полезные отражения маскируются цугом дисперсионных волн Лява, в поверхностно-экранирующем разрезе нет условий для их образования [Романов, Иванов, 2021].

Но влияние ПВС на поле горизонтально-поляризованных волн нельзя свести только к положительным эффектам. Подошва высокоскоростной аномалии вблизи поверхности становится контрастной кратнообразующей границей [Романов, 2021], а с увеличением мощности ПВС заметно меняются значения скоростных интегральных характерис-

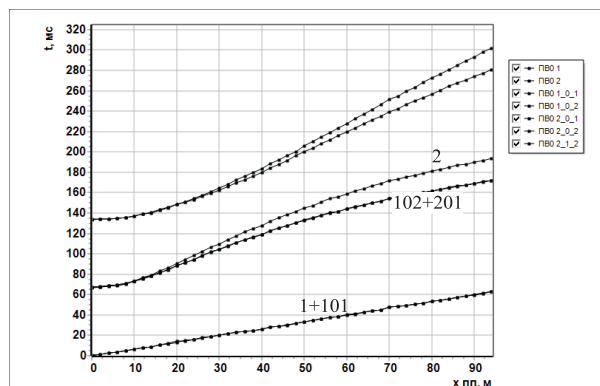
тик, применяемых для обработки и в оценке пластовых скоростей. В статье предлагается алгоритм поэтапного учёта влияния ПВС и корректного определения предельных эффективных, пластовых и средних скоростей в районах распространения сезонно-мёрзлых грунтов.

Методика и результаты эксперимента

В поверхностно-экранирующих разрезах из-за повышенной скорости первого слоя наблюдается существенная квазианизотропия эффективной скорости, выражаемая в систематическом росте этой величины с удалением [Романов и др., 2023]. Для оценки степени квазианизотропии эффективной скорости была создана типовая сейсмическая модель поверхностно-экранирующего разреза с неглубоко залегающей отражающей границей (Таблица 1) и переменной мощностью первого (сезонно-мёрзлого) слоя. По моделям были рассчитаны годографы полезных и кратно-отражённых волн по левофланговой расстановке с шагом приёма 2 м и длиной 94 м [Романов, 2022].

	Слой 1	Слой 2
h , м	0,1-2,0	10
V_S , м/с	1500	300

▲ Табл. 1. Слоистая модель разреза с сезонно-мёрзлым слоем.



▲ Рис. 2. Годографы полезных (1,2) и кратных (101, 102, 201, 202 и 212) волн, вычисленные по модели поверхностно-экранирующего разреза.

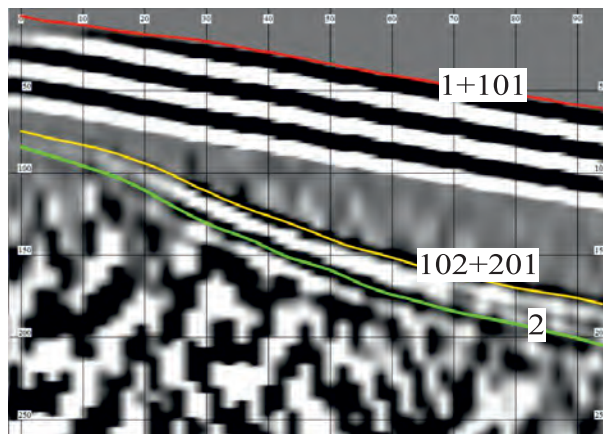
На рисунке 2 приведены годографы отражённых волн для $h_1=0.2$ м. Примечательно, что частично-кратные волны 102 и 201 отличаются меньшей крутизной годографа, чем у полезной волны 2. Сам годограф полезной волны имеет выраженную негиперболическую форму, что объясняется значительным горизонтальным градиентом эффективной скорости.

Синтетическая сейсмограмма (Рисунок 3), полученная по годографам рисунка 2, включает интенсивные частично-кратные волны, что требует особой тщательности в поиске полезных отражений в условиях ПЭР.

Способом квадратических координат были найдены параметры наилучшего гиперболических приближения годографов волн 1 и 2. Подстановкой среднеквадратической скорости V_{RMS} в качестве средней были найдены глубины слоёв и

▼ Табл. 2. Результаты определения параметров модели скоростного разреза по средне-квадратическим скоростям.

	Слой 1	Слой 2
t_0 , мс	0,3	90
V_{RMS} , м/с	1500	508
H , м	0,2	23 (11)
V , м/с	1500	504(300)



▲ Рис. 3. Модельная сейсмограмма, полученная по годографам рисунка 2. Цифрами выделены оси синфазности волн.

пластовые скорости (3–4). Результаты представлены в таблице 3, отмечается переуглубление границы на 100 %, пластовой скорости второго слоя на 70 %, то есть простой расчёт показывает, что в ПЭР результаты скоростного анализа без предварительной коррекции использовать для определения пластовых свойств нельзя.

$$H = V_{RMS} \frac{t_0}{2} \quad (3)$$

$$V_2 = V_1 \frac{t_{02} \frac{V_{RMS2}}{V_1} - t_{01}}{t_{02} - t_{01}} \quad (4)$$

Для определения квазианизотропии эффективной скорости по годографу отражённой волны была построена кривая нарастания скорости — график зависимости V_s от удаления. Для расчёта кривой методом наименьших квадратов находился наклон каждой точки квадратической трансформанты годографа.



▲ Рис. 4. Кривая нарастания скорости по годографу отражённой волны 2 (см. рис 1).

Начиная с удалений порядка 1,2H кривая нарастания скорости удовлетворительно аппроксимируется возрастающей функцией вида (5), где V_0 — оценка предельной эффективной скорости, а β , км^{-1} — коэффициент квазианизотропии.

$$V(l) = V_0 e^{\beta l} \quad (5)$$

Подстановка в выражения (3)–(4) предельной скорости вместо эффективной (среднеквадратической) позволяет на порядок уменьшить погрешности определения параметров модели скоростного разреза (Таблица 3).

Выводы

Влияние приповерхностного высокоскоростного слоя на результаты инженерной сейсморазведки состоит не только в исчезновении мешающих поверхностных волн Лява, но и появлении значи-

мой квазианизотропии эффективной скорости отражённых волн. Предлагаемая авторами коррекция результатов скоростного анализа МОВ основывается на аппроксимации кривой нарастания эффективной скорости возрастающей экспоненциальной зависимостью с последующим переходом к предельно-эффективной скорости. Такой подход позволяет на порядок увеличить точность нахождения глубин границ и пластовых скоростей в методе отражённых волн.

Литература

1. Использование сейсмических и георадиолокационных методов в геокриологических исследованиях / М. Р. Садурдинов, А. Г. Скворцов, М. С. Судакова [и др.] // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. — 2017. — № 4. — С. 75-86. — EDN YTPBSS.

▼ Табл. 3. Результаты определения параметров модели скоростного разреза по предельно-эффективным скоростям.

	Слой 1	Слой 2
t_0 , мс	0,3	81
V_0 , м/с	1500	300
β , км^{-1}	0,1	5,41
H , м	0,2	12 (11)
V , м/с	1500	295(300)

2. Криволапчук, М. Л. Отражённые волны в сейсмическом микрорайонировании / М. Л. Криволапчук, В. В. Романов // Инженерная сейсморазведка и сейсмология - 2019 : Сборник тезисов 2-й научно-практической конференции, Москва, 28–30 октября 2019 года / Под редакцией М.Р. Садуртдинова, М.С. Судаковой. – Москва: Издательский Дом "Академия Естествознания", 2019. – С. 40–44. – EDN QLEGFS.

3. Леонович, И. И. Статистический метод определения глубины промерзания грунтов / И. И. Леонович, Н. П. Вырко, М. Н. Демидко // Труды БГТУ. №2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. – 2015. – № 2(175). – С. 27–31. – EDN WMSHPZ.

4. Романов, В. В. Влияние приповерхностного высокоскоростного слоя на динамические и кинематические свойства отражённых волн / В. В. Романов // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2021. – № 1(68). – С. 58–63. – EDN ZJBBDV.

5. Романов, В. В. Анализ развития терминологической базы методики двумерной сейсморазведки и предложения по её развитию и унификации / В. В. Романов // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2022. – Т. 64, № 1. – С. 61–74. – DOI 10.32454/0016-7762-2022-64-1-61-74. – EDN DIEHWD.

6. Романов, В. В. Инженерная сейсморазведка методом отражённых волн в Москве / В. В. Романов, М. Б. Шнеерсон // Геофизика. – 2018. – № 6. – С. 75–81. – EDN SRACOD.

7. Романов, В. В. Влияние приповерхностного высокоскоростного слоя на сейсмограммы мов / В. В. Романов, А. А. Иванов // ГеоЕвразия-2021. Геологоразведка в современных реалиях : Труды IV Международной геолого-геофизической конференции и выставки, Москва, 02–04

марта 2021 года / ООО «ГеоЕвразия». Том II. – г. Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2021. – С. 37–39. – EDN VBQYPQ.

8. Романов, В. В. Влияние приповерхностного высокоскоростного слоя на динамические и кинематические свойства отражённых волн / В. В. Романов // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2021. – № 1(68). – С. 58–63. – EDN ZJBBDV.

9. Скворцов А.Г., Дроздов Д.С., Малкова-Ананьева Г.В., Мельников Е.С. Структура поля упругих колебаний в верхней части разреза нелитифицированных многолетнемерзлых пород // Отчет о НИР № 97-05-65609. Российский фонд фундаментальных исследований. 1997.

10. Учёт негиперболичности годографа отражённой волны при скоростном анализе МОВ-ОСТ в условиях частично-инверсного скоростного разреза / В. В. Романов, К. С. Сергеев, А. Д. Горин, В. И. Рыжков // Инженерная и рудная Геофизика 2023 : Сборник материалов 19-й научно-практической конференции и выставки, Санкт-Петербург, 15–19 мая 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ", 2023. – С. 543–551. – EDN IXIGIX.