

РУБРИКА: ИНЖЕНЕРНАЯ И РУДНАЯ ГЕОФИЗИКА

Оценка влияния приповерхностных условий на волновое поле поперечных волн

А. М. Турчков (МГУ им. М. В. Ломоносова), А. П. Рухманова (МГУ им. М. В. Ломоносова)

Волны Лява — тип поверхностных волн, регистрируемых при проведении инженерно-сейсморазведочных исследований на поперечных волнах. Они существенно осложняют интерпретацию данных за счет маскировки полезных отраженных событий. В связи с этим актуальной задачей является изучение факторов, определяющих интенсивность дисперсии волн Лява.

Целью работы являлось исследование влияния параметров приповерхностной среды на формирование дисперсионных свойств волн Лява. Для решения поставленной задачи выполнено конечно-разностное моделирование волнового поля SH-волн, зарегистрированных по схеме $Y - Y$, в ПО Tesserat Engineering. Рассмотрено влияние отношения длины волны к мощности слоя (λ/h), частоты источника, контраста скоростей на границе раздела, вертикального градиента скорости, а также скорости и мощности приповерхностного высокоскоростного слоя.

Параметр λ/h является основным фактором, определяющим характер волнового поля и интенсивность дисперсии. Максимальная выраженность дисперсионного цуга наблюдается при значениях λ/h около 7–8. Изменение частоты источника при фиксированном значении λ/h практически не влияет на качественную структуру волнового поля, однако определяет его спектральное наполнение и степень детализации записи. Увеличение контраста скоростей усиливает амплитуды интерферирующих волн и способствует более эффективной локализации энергии в волноводе. Наличие вертикального градиента скорости приводит к уменьшению дисперсионных эффектов по сравнению с моделью резкого скоростного контраста. Присутствие тонкого приповерхностного высокоскоростного слоя подавляет волны Лява, позволяя выделить отражения, однако искажает их кинематические и динамические характеристики. Полученные результаты позволяют прогнозировать структуру реальных сейсмограмм и обосновывать выбор алгоритмов подавления помех.

Ключевые слова: поверхностные волны, волны Лява, SH-волны, дисперсия, приповерхностный низкоскоростной слой, приповерхностный высокоскоростной слой, отношение λ/h , конечно-разностное моделирование, инженерная сейсморазведка.

Assessment of the influence of near-surface conditions on the shear wavefield

A. M. Turchkov (Moscow State University), A. P. Rukhmanova (Moscow State University)

Love waves are a type of surface wave commonly recorded during engineering seismic surveys utilizing shear (SH) waves. They significantly complicate data interpretation by obscuring primary reflections. Consequently, identifying the factors that control Love wave dispersion intensity is a critical research objective.

This study aims to investigate the influence of near-surface medium parameters on the development of Love wave dispersion characteristics. To address this, finite-difference modeling of the SH-wave field acquired with a Y — Y geometry was conducted using the Tesseral Engineering software package. The analysis focused on the effects of the wavelength-to-layer-thickness ratio (λ/h), source frequency, interfacial velocity contrast, vertical velocity gradient, and the velocity and thickness of a near-surface high-velocity layer (HVL).

Results indicate that the λ/h ratio is the dominant factor governing the wavefield structure and dispersion intensity. The most pronounced dispersive wave train is observed at λ/h values of approximately 7–8. While varying the source frequency at a constant λ/h does not alter the qualitative wavefield structure, it directly controls the spectral content and resolution of the records. Increased velocity contrast amplifies interfering wave amplitudes and enhances energy trapping within the waveguide. Conversely, a vertical velocity gradient mitigates dispersion effects compared to models featuring a sharp velocity contrast. The presence of a thin near-surface HVL suppresses Love waves, thereby improving reflection visibility, but introduces distortions to their kinematic and dynamic characteristics.

These findings provide a predictive framework for real seismogram interpretation and support the optimization of coherent noise attenuation algorithms.

Keywords: surface wave, Love wave, SH waves, dispersion, near-surface low-velocity layer, near-surface high-velocity layer, λ/h ratio, finite-difference modeling, engineering seismic exploration.

Введение

Приповерхностные условия оказывают критическое искажающее воздействие на волновую картину поперечных волн. Скоростной контраст на границе рыхлых отложений и более твердых пород превращает верхний слой в волновод, где формируются интенсивные поверхностные волны Лява. Кроме того, маломощные приповерхностные неоднородности вносят искажения в годографы и динамические характеристики волнового поля [1].

В методе отраженных волн (МОВ) горизонтально поляризованные поперечные волны традиционно используются для решения широкого круга геологических задач. Метод с успехом применяется в инженерной сейсморазведке для изучения границ на глубинах до 50–60 м, а в особо благоприятных условиях — до 100 м и более [2, 3]. Однако в зависимости от приповерхностных условий поверхностные волны Лява, наблюдаемые на сейсмограммах схемы $Y-Y$, могут серьезно осложнять прослеживание отраженных волн.

Цель данного исследования — используя численное моделирование, выполнить оценку степени влияния приповерхностных условий на волновое поле поперечных волн.

Волны Лява

Волны Лява представляют собой поверхностные сейсмические волны с горизонтальной поляризацией (SH-тип), которые могут существовать исключительно в слоистых средах. Необходимым и достаточным условием их возникновения является наличие слоя конечной мощности, лежащего на полупространстве, при этом скорость поперечных волн в слое должна быть меньше, чем в подстилающем полупространстве. Волна Лява формируется в результате интерференции объемных SH-волн, многократно отраженных от границ слоя, и распространяется вдоль него, экспоненциально затухая вглубь более жесткого полупространства. Большая часть энергии деформации, связанной с распространением поверхностных волн, сосредоточена на глубине около одной длины волны λ от поверхности [4].

Волна Лява обладает дисперсией, то есть ее фазовая скорость зависит от частоты колебаний, что приводит к существованию нескольких мод распространения. Низкочастотные и высокочастотные составляющие распространяются с разными скоростями, вызывая расслоение импульса и его временное уширение [5]. Резонанс SH-волн соответствует точкам максимальной кривизны дисперсионных кривых волн Лява [6]. Резонансная частота может быть оценена как четверть от скорости

поперечной волны в верхнем слое, деленная на его мощность. Дисперсия зависит от комбинации геометрических (мощность слоя) и упругих (скорости поперечных волн и плотности) параметров разреза. Такие приповерхностные условия, как малая мощность и низкая скорость верхнего слоя, создают идеальные условия для возникновения ярко выраженной дисперсии волн Лява [7].

Методика исследования

В работе выполнялось численное моделирование в программном комплексе Tesserat Engineering с использованием упругого конечно-разностного алгоритма (2.5D Elastic). Геологическая среда задавалась в виде горизонтально-слоистой среды, с различной скоростью поперечных волн и мощностью каждого слоя (рис. 1).

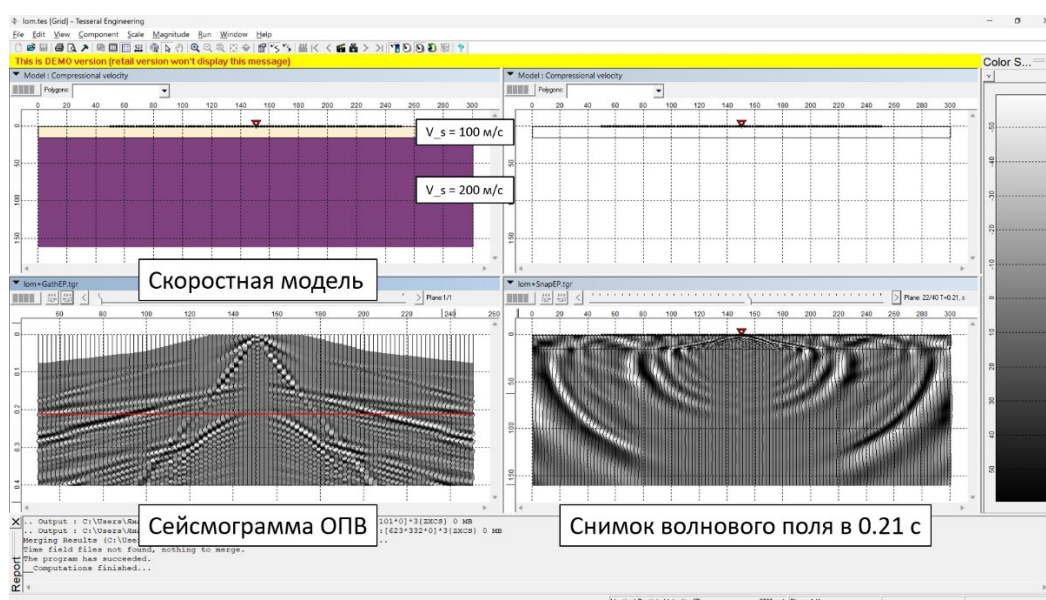


Рисунок 1. Окно программы Tesserat Engineering

Моделирование проводилось для схемы возбуждения и регистрации SH-волн $Y-Y$. В качестве источника использовался горизонтальный монополь с импульсом Риккера. Частота источника изменялась в диапазоне от 5 до 50 Гц. Размер модели составлял 300×60 м, длина приемной линии — 200 м при шаге между приемниками 2 м. источник располагался в центре приемной линии.

В ходе работы было выполнено более 100 численных экспериментов для двух-, трех- и четырехслойных моделей. Исследовалось влияние следующих факторов:

- мощности приповерхностного низкоскоростного слоя;
- отношения λ/h ;

- частоты источника;
- контраста скоростей;
- вертикального градиента скорости;
- скорости приповерхностного высокоскоростного слоя (ПВС);
- мощности приповерхностного высокоскоростного слоя.

Наряду с визуальным анализом сейсмограмм для количественной оценки интенсивности дисперсионных эффектов был рассчитан параметр дисперсии. Расчет параметра выполнялся на основе анализа огибающих сигнала. Для каждой сейсмограммы выбирались две трассы: первая соответствовала минимальному удалению от источника, а вторая — максимальному удалению в пределах приемной линии. Для обеих трасс рассчитывалась огибающая сигнала с использованием преобразования Гильберта. Далее выполнялась трассовая нормировка огибающих, позволяющая исключить влияние абсолютных амплитуд и сосредоточиться на изменении временной структуры волнового поля. После нормировки определялись интегральные характеристики сигнала путем суммирования значений огибающей вдоль каждой трассы. Параметр дисперсии вычислялся как отношение суммы значений огибающей на дальней трассе к аналогичной величине на ближней трассе.

Анализ влияния толщины верхнего слоя

На рисунке 2 представлены три сейсмограммы с толщиной верхнего слоя h 17.0, 3.0 и 0.6 м соответственно. При мощном верхнем слое дисперсии нет. С уменьшением слоя проявляется дисперсия волн Лява. Однако при дальнейшем уменьшении слоя до значений меньше метра дисперсия становится все менее выраженной.

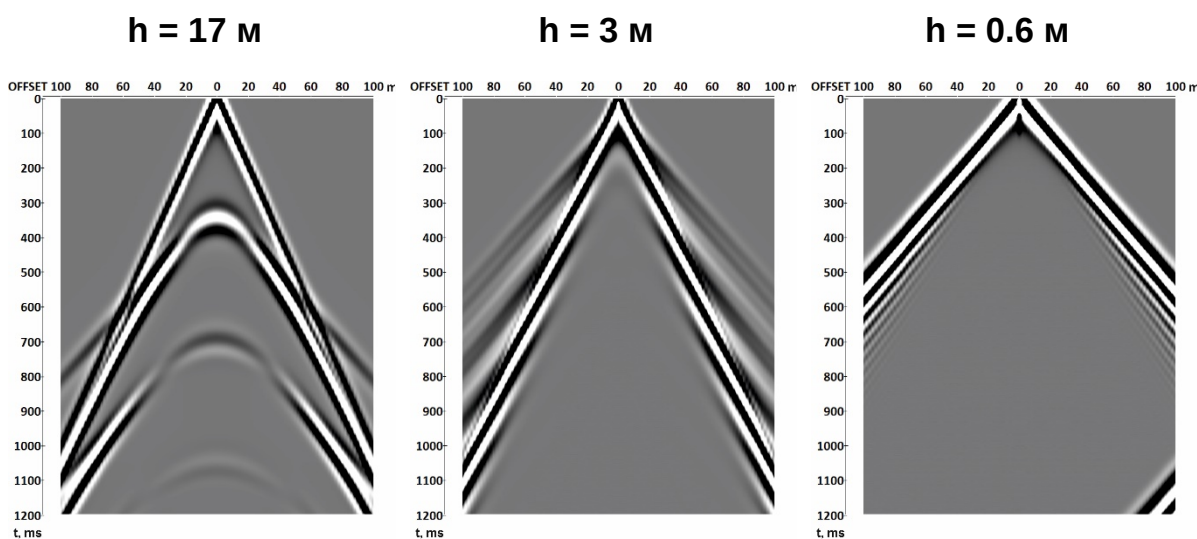


Рисунок 2. Влияние h на сейсмограммы

Для уточнения параметров, при которых дисперсия волн Лява максимальна, было проведено сравнение сейсмограмм при различном соотношении мощности верхнего слоя к длине волны λ/h (рис. 3).

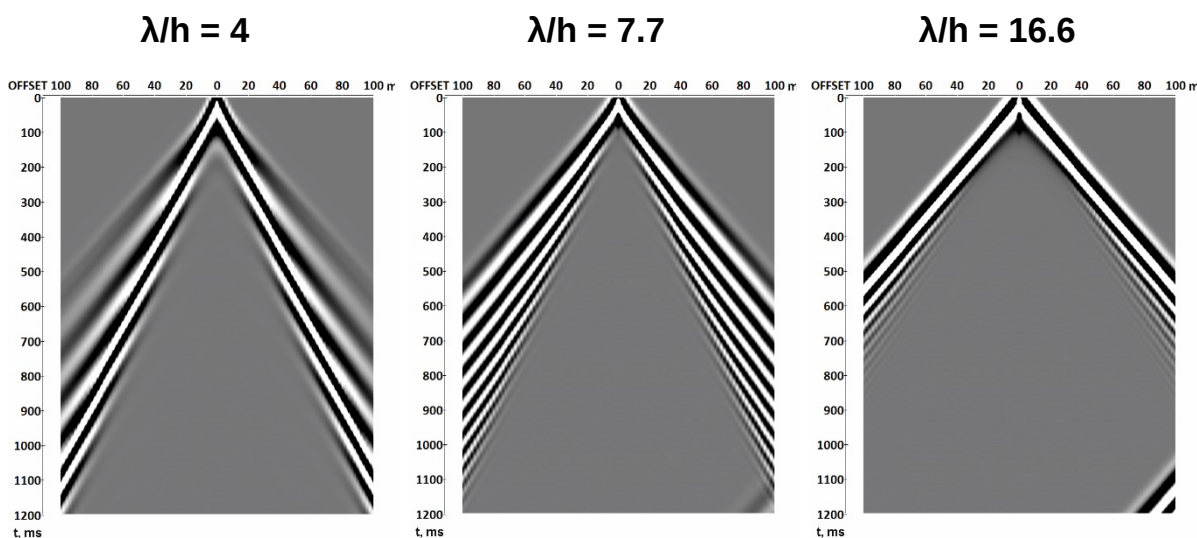
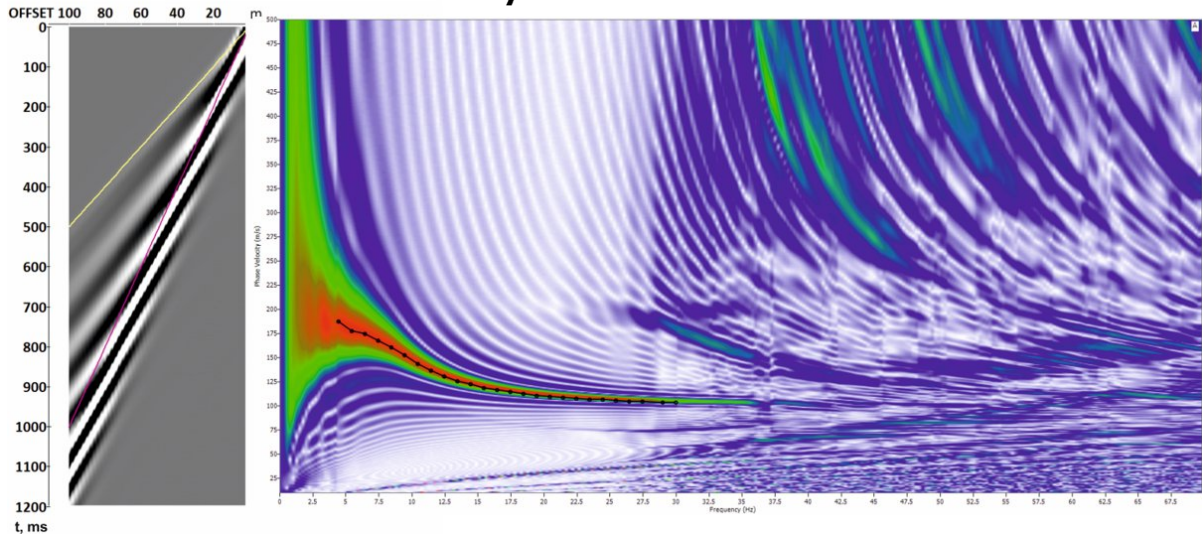


Рисунок 3. Влияние λ/h на сейсмограммы

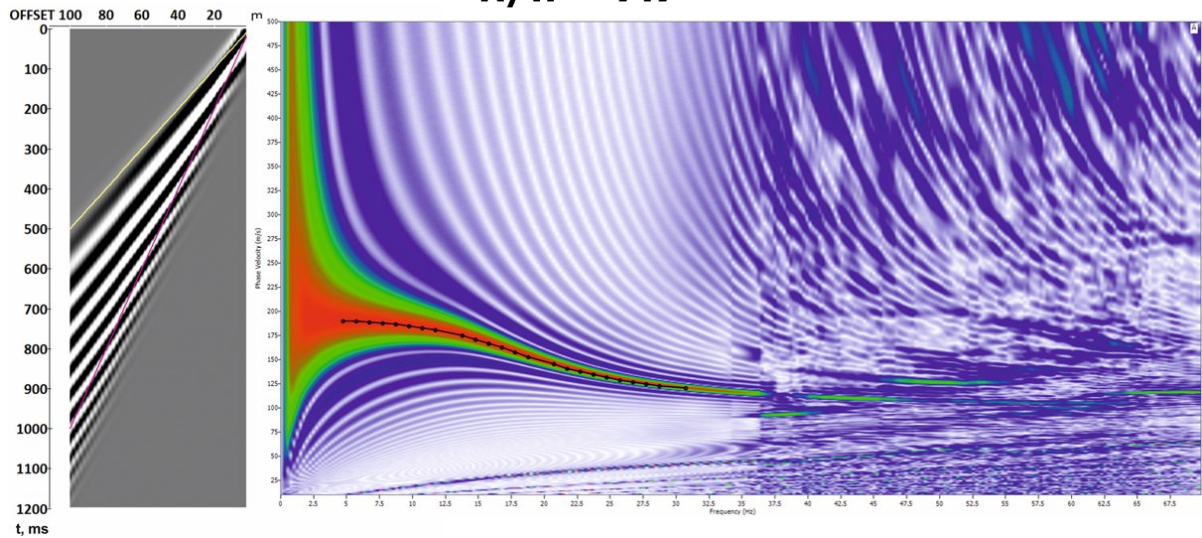
Волновая картина изменяется при различии λ/h : сперва при возрастании этого коэффициента наблюдается увеличение дисперсии, когда значение достигает примерно 7–8, дисперсия максимальна и отраженную волну становится невозможно отследить. При дальнейшем увеличении соотношения дисперсия уменьшается, слой становится столь малым относительно длины волны, что им можно пренебречь.

Для оценки дисперсии были построены дисперсионные изображения (ДИ) для сейсмограмм (рис. 3). Желтыми и розовыми прямыми на сейсмограммах показаны скорости 100 м/с и 200 м/с соответственно (рис. 4).

$\lambda/h = 4$



$\lambda/h = 7.7$



$\lambda/h = 16.6$

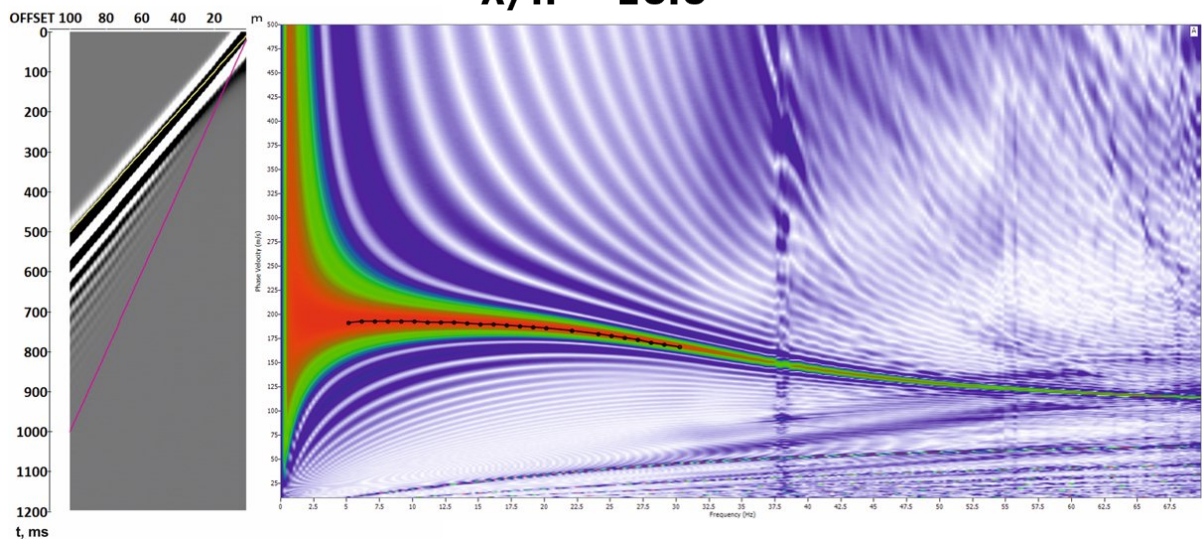


Рисунок 4. Дисперсионные изображения для различного соотношения λ/h

На всех ДИ прослеживается фундаментальная мода и отсутствуют высшие. При значениях параметра $\lambda/h = 4$ пропикированная дисперсионная кривая выпуклая вниз, при больших значениях — выпуклая вверх. На высоких частотах дисперсионные кривые становятся более пологими, что свидетельствует об уменьшении дисперсионных эффектов. Для всех сейсмограмм фундаментальная мода уверенно выделяется в диапазоне частот до 30 Гц. При этом наиболее интенсивная часть дисперсионной кривой наблюдается в области низких частот. В среднем скорости фундаментальной моды изменяются от 100 до 200 м/с.

Для оценки интенсивности дисперсии поверхностных волн Лява на сейсмограммах был применен специальный алгоритм, основанный на сравнении амплитудных характеристик волнового поля на ближних и дальних удалениях от источника, описанный подробнее в методике исследования. Физический смысл данного параметра заключается в оценке степени распространения энергии поверхностной волны при распространении вдоль профиля. Чем больше значение полученного отношения, тем более протяженным по времени является дисперсионный цуг и тем сильнее проявляются дисперсионные свойства волны Лява (рис. 5).

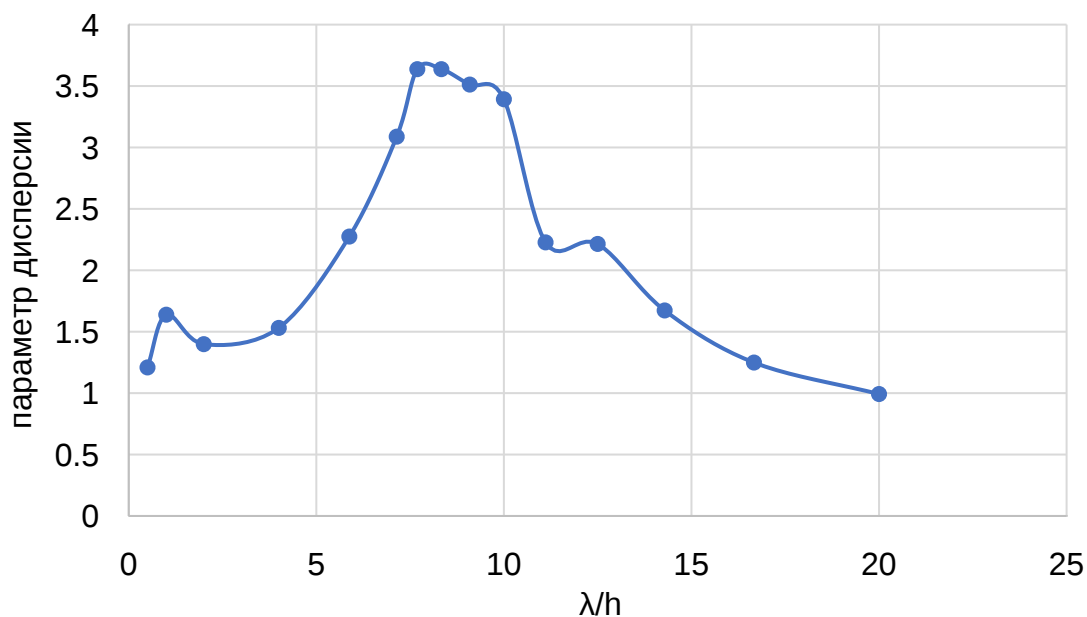


Рисунок 5. Зависимость рассчитанного параметра дисперсии от λ/h

Максимум графика составляет 3.64 и наблюдается при $\lambda/h \approx 8$, при уменьшении или увеличении отношения λ/h интенсивность параметра несимметрично уменьшается.

Анализ влияния частоты источника

Для оценки влияния частоты источника были рассмотрены сейсмограммы с равным λ/h при разной частоте (рис. 6).

Для сохранения постоянства параметра λ/h мощность верхнего низкоскоростного слоя изменялась обратно пропорционально частоте. Рассматривались частоты 5, 10 и 20 Гц. Скоростные параметры среды при этом оставались постоянными: скорость SH-волн в верхнем слое составляла 100 м/с, а в полупространстве — 200 м/с. Мощность верхнего слоя изменялась от 0.5 до 10 м.

Для всех частот при $\lambda/h = 2$ дисперсионные эффекты выражены минимально по сравнению с остальными сейсмограммами. При увеличении отношения λ/h до 4 дисперсия становится более выраженной. Для всех частот при $\lambda/h = 10$ наблюдается наиболее выраженная дисперсия поверхностных волн. На сейсмограммах формируется протяженный дисперсионный цуг с большой временной длительностью. При частоте 5 Гц сейсмограммы наименее детальные. При увеличении частоты уменьшается длина волны, вследствие чего возрастает число регистрируемых колебаний, оси синфазности становятся тоньше и улучшается временное разрешение сейсмограмм. На сейсмограммах с частотой источника 20 Гц наблюдаются характерные признаки пространственного альясинга. Это происходит по причине того, что выбранный шаг наблюдений (2 м) слишком крупный относительно длины волны SH-волн, что и приводит к искажению формы и кажущемуся изменению направления распространения волновых событий.

При одинаковом значении λ/h и различной частоте источника общая структура волнового поля сохраняется. При одной частоте и возрастающем соотношении длины волны к мощности верхнего слоя дисперсия поверхностной волны Лява распространяется на большую зону. Полученные результаты показывают, что частота источника влияет на детализацию и спектральное наполнение сигнала, но при фиксированном λ/h качественная картина остается инвариантной. Это подтверждает ключевую роль геометрического параметра λ/h в формировании волнового поля при наличии приповерхностного низкоскоростного слоя.

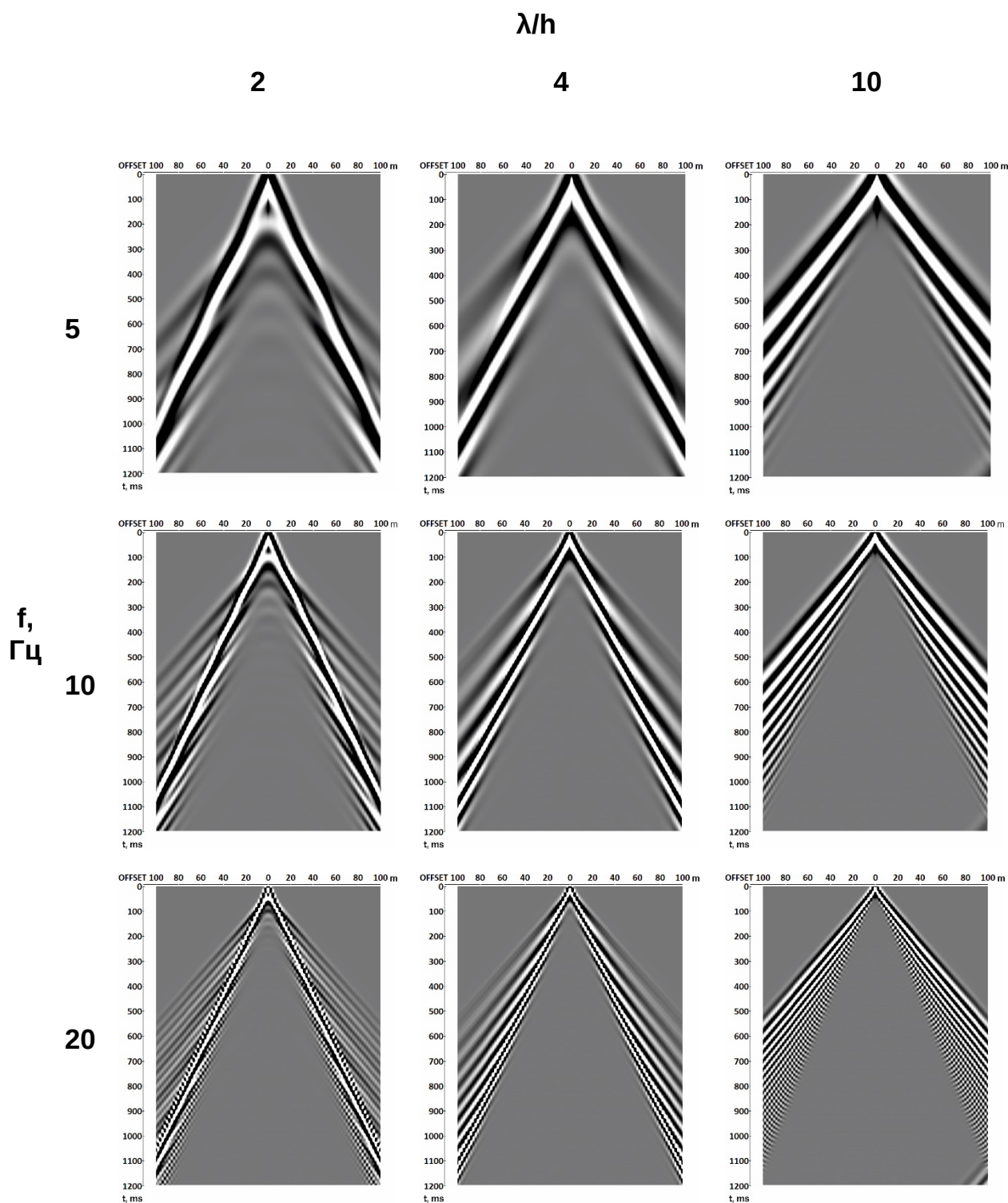


Рисунок 6. Влияние f и λ/h на сейсмограммы

Анализ влияния контраста скоростей

На рисунке 7 представлены три сейсмограммы с различной скоростью подстилающего полупространства V_2 : 200, 300 и 400 м/с при едином значении $\lambda/h = 2.5$. При этом скорость приповерхностного слоя оставалась

неизменной и составляла 100 м/с. Частота источника — 10 Гц, мощность слоя — 4 м.

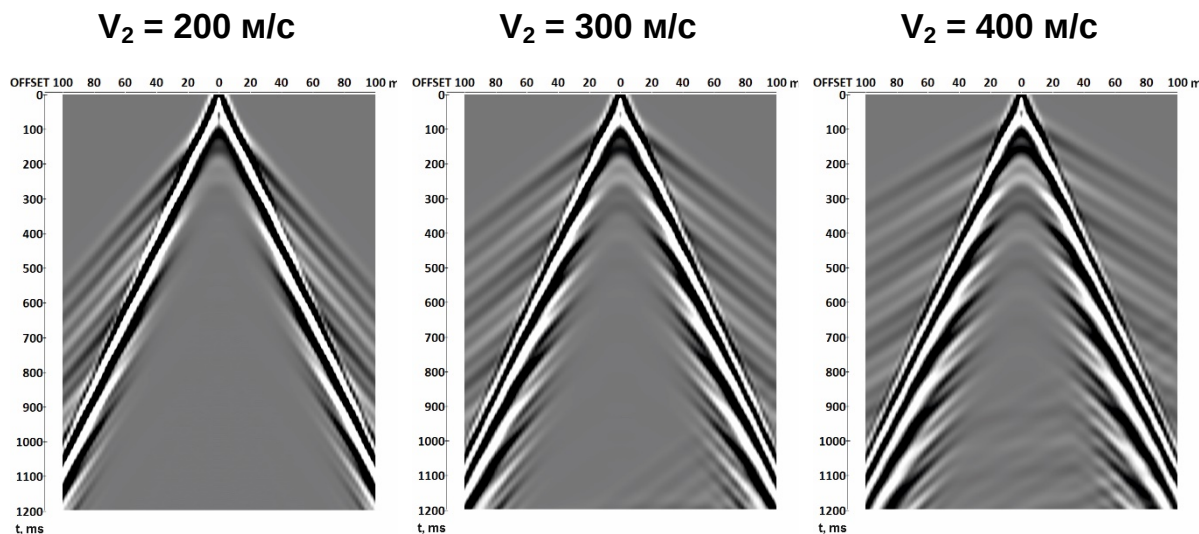


Рисунок 7. Влияние контраста скоростей на сейсмограммы

Сейсмограммы для трех значений скорости полупространства демонстрируют сходный характер волнового поля. Однако с ростом контраста скоростей увеличиваются амплитуды интерферирующих волн, связанных с многократными отражениями на границе раздела, а распределение энергии между поверхностными и объемными волнами заметно изменяется. Более высокий контраст способствует более эффективному запиранию энергии в волноводе и усилению волн Лява, что повышает их роль как помехи для поля отраженных волн.

Анализ влияния градиента скорости

Для изучения влияния градиента скорости была рассмотрена модель с верхним слоем мощностью 2.4 м с различными скоростными распределениями: однородный слой с $V_0 = 100$ м/с, слой с линейным повышением скорости от 100 до 150 м/с и два градиентных слоя с последовательным увеличением скорости от 100 до 150 м/с и от 100 до 175 м/с по подслоям. Во всех моделях ниже залегает слой со скоростью 200 м/с. Частота источника — 5 Гц (рис. 8).

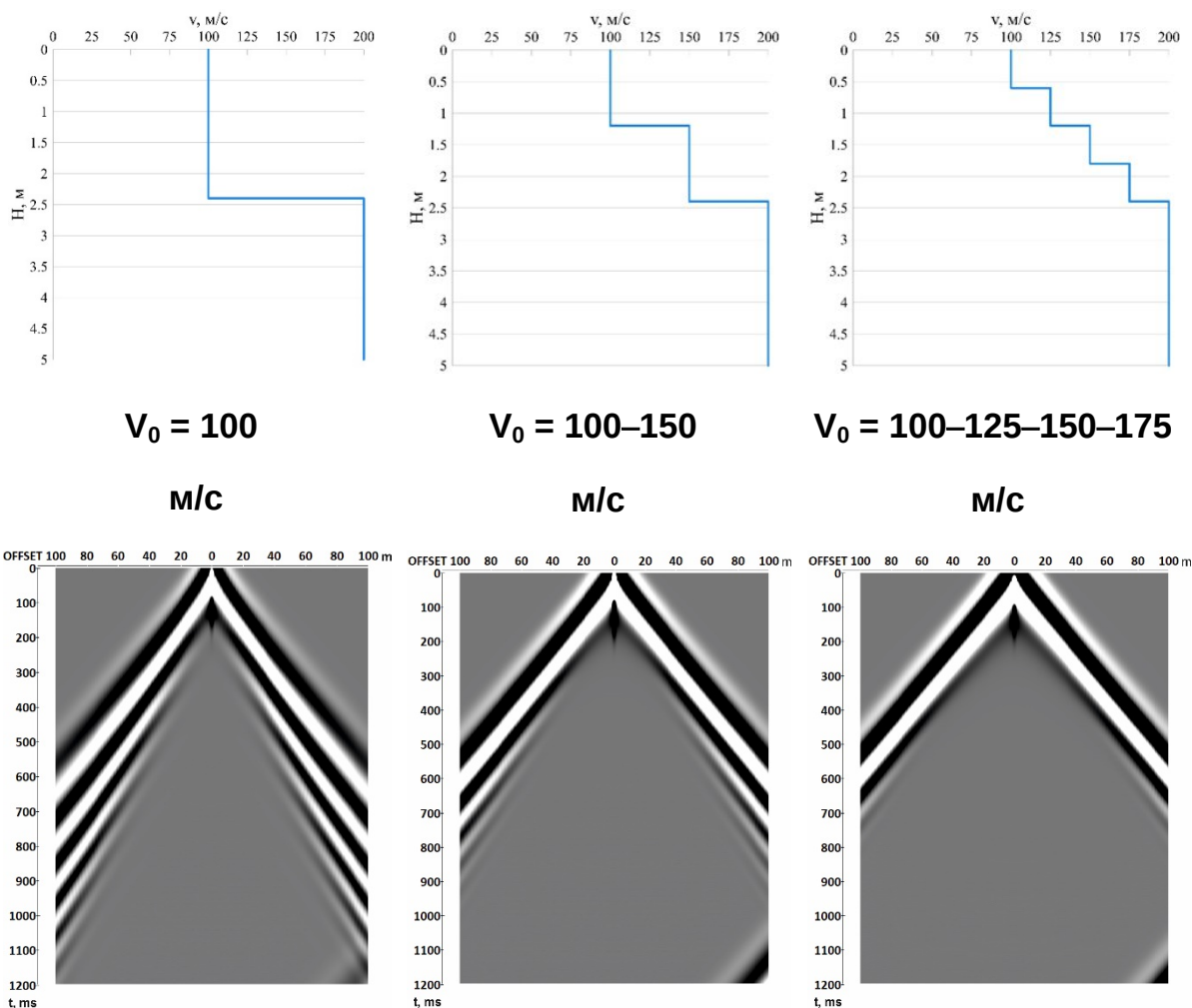


Рисунок 8. Влияние градиента скорости приповерхностного низкоскоростного слоя: сверху скоростные законы, снизу соответствующие им сейсмограммы

На первой сейсмограмме для случая однородного верхнего слоя наблюдается наиболее выраженный дисперсионный цуг поверхностных волн. Волна Лява имеет значительную временную протяженность. По сравнению с однородной моделью у второй и третьей сейсмограммы дисперсия поверхностной волны становится менее выраженной.

Максимальная выраженность дисперсии наблюдается при скачкообразном изменении скорости на границе слоя и полупространства, то есть при наиболее резком контрасте параметров. Постепенное увеличение скорости с глубиной снижает эффективность локализации энергии в верхней части разреза и уменьшает вклад поверхностных волн в общее волновое поле.

Анализ влияния ПВС

Классическая теория волн Лява оперирует моделью, где скорость поперечных волн в покрывающем слое меньше, чем в подстилающем полупространстве, однако в инженерных условиях нередко бывает обратная ситуация. Сверху залегает тонкий высокоскоростной слой, подстилаемый более медленными толщами. Таким слоем может выступать, например, асфальт, бетон над рыхлым грунтом, литой фундамент над грунтом, мерзлый слой над талой породой, засоленные грунты и прочее [7].

Для исследования влияния приповерхностного высокоскоростного слоя был введен дополнительный высокоскоростной слой над низкоскоростным волноводом, в котором формируются волны Лява. Скорость низкоскоростного слоя, залегающего под ПВС, составляла 100 м/с. Ниже находился еще один слой со скоростью 400 м/с, введенный в модель для формирования целевой отражающей границы на глубине 130 м. Это позволило анализировать степень маскировки полезных отражений при различных параметрах приповерхностного слоя и оценивать, насколько изменение дисперсии влияет на качество выделения целевой отраженной границы на сейсмограммах. Скорость SH-волн в полупространстве — 700 м/с.

На первом этапе анализировалось влияние скорости высокоскоростного слоя. Скорость изменялась в диапазоне от 200 до 1000 м/с при постоянной мощности слоя 0.5 м (рис. 9).

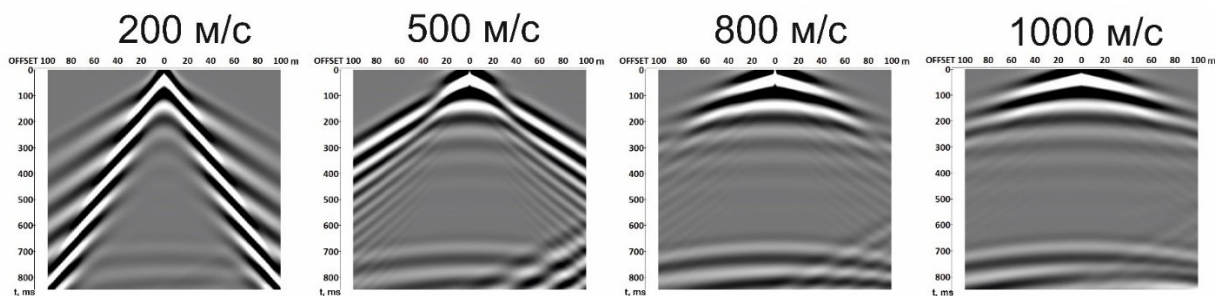


Рисунок 9. Влияние скорости ПВС

Результаты моделирования показали, что увеличение скорости приводит к последовательному ослаблению дисперсионного цуга волн Лява. При скорости 200 м/с поверхностные волны сохраняют значительную амплитуду. Дальнейшее увеличение скорости сопровождается уменьшением амплитуды поверхностных волн и существенным улучшением прослеживаемости отражения от целевой границы. При скоростях 800–1000 м/с дисперсионные эффекты становятся минимальными, а отраженная волна уверенно выделяется на всех удалениях. Полученный результат объясняется нарушением условий локализации энергии в низкоскоростном волноводе. Наличие

высокоскоростного слоя вблизи поверхности изменяет характер отражения SH-волн и снижает эффективность формирования волн Лява, вследствие чего уменьшается интенсивность дисперсии.

Дополнительно было исследовано влияние мощности высокоскоростного слоя при фиксированной скорости (рис. 10).

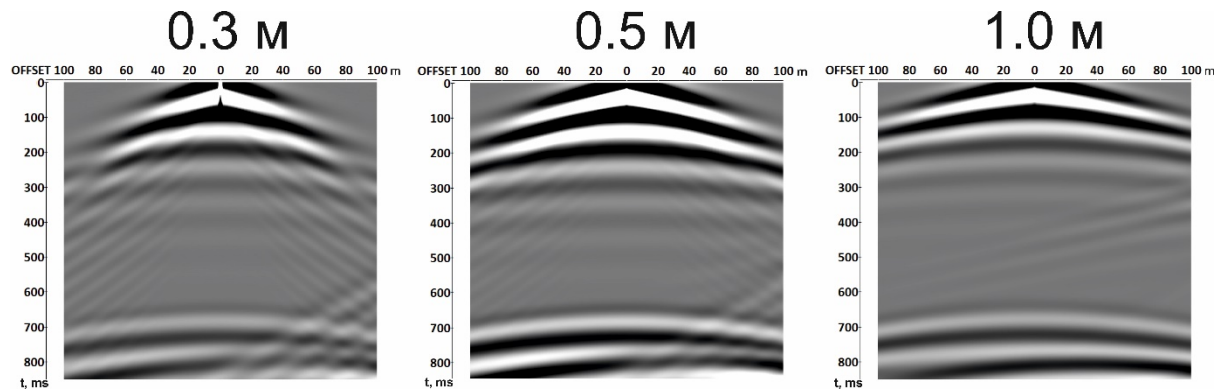


Рисунок 10. Влияние мощности ПВС

Даже тонкий слой мощностью порядка нескольких десятков сантиметров оказывает заметное влияние на структуру волнового поля. Увеличение мощности сопровождается дальнейшим подавлением поверхностных волн, однако после достижения определенного значения эффект становится менее выраженным. Основные изменения происходят при увеличении мощности от 0.3 до 1 м, тогда как дальнейший рост мощности приводит лишь к незначительным изменениям волновой картины.

Выводы

В работе приведены синтетические сейсмограммы Y — Y регистрации, полученные с помощью конечно-разностного моделирования верхней части разреза. Результаты моделирования позволили оценить степень влияния ключевых приповерхностных факторов на волновое поле поперечных волн.

Отношение λ/h — ключевой параметр, влияющий на волновую картину. Максимальная выраженность дисперсионного цуга наблюдается при $\lambda/h \approx 7-8$ и резком (скачкообразном) изменении скорости в верхнем слое. Скорость подстилающего полупространства контролирует амплитудное соотношение между поверхностными и объемными волнами, но не положение максимума дисперсии. Рассчитанный параметр дисперсии позволил перейти от качественного визуального анализа сейсмограмм к количественному сравнению волновых полей.

Присутствие ПВС приводит к кардинальному изменению структуры волнового поля SH-волн. Главный эффект — отсутствие видимых

низкоскоростных прямых и поверхностных волн. Выявленные закономерности могут быть использованы для прогнозирования структуры реальных сейсмограмм в различных геологических условиях, а также для обоснования выбора оптимальных алгоритмов подавления волн-помех и коррекции искажающих эффектов.

Список литературы

1. Романов В. В. Влияние приповерхностного высокоскоростного слоя на динамические и кинематические свойства отраженных волн / В. В. Романов // Приборы и системы разведочной геофизики. — 2021. — № 1 (68). — С. 58–63.
2. Романов В. В. Инженерная сейсморазведка методом отраженных волн в Москве / В. В. Романов, М. Б. Шнеерсон // Геофизика. — 2018. — № 6. — С. 75–81.
3. Турчков А. М. Отличительные особенности проведения работ на продольных и поперечных волнах методом отраженных волн при изучении верхней части разреза / А. М. Турчков, А. Н. Ошкин, И. А. Зиновьев [и др.] // Инженерная и рудная геофизика — 2020: материалы науч.-практ. конф., Пермь, Россия, 12–16 мая 2020 г. — Пермь, 2020.
4. Aki K. Quantitative seismology: theory and methods / Aki K., Richards P. G. — W. H. Freeman & Co. — 1980. — P. 162–178.
5. Dal Moro G. Surface Wave Analysis for Near Surface Applications / Dal Moro G. — Amsterdam: Elsevier, 2014.
6. Foti S. Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization / Foti S., Lai C. G., Rix G. J., Strobbia C. — Boca Raton: CRC Press, 2015.
7. Скворцов А. Г. Высокора разрешающая сейсморазведка на поперечных волнах (ВСПВ) — физические основы, технология и опыт применения / Скворцов А. Г. // 6-я международная научно-практическая конференция и выставка «Инженерная и рудная геофизика — 2010». Учебный курс. — Геленджик, 2010.

References

1. Romanov V. V. Vliyanie pripoverkhnostnogo vysokoskorostnogo sloya na dinamicheskie i kinematicheskie svoystva otrazhennykh voln [Influence of a near-surface high-velocity layer on the dynamic and kinematic properties of reflected waves] // Devices and Systems of Exploration Geophysics. — 2021. — No. 1(68). — P. 58–63 (in Russ.).
2. Romanov V. V. Inzhenernaya seysmorazvedka metodom otrazhennykh voln v Moskve [Engineering reflection seismic survey in Moscow] / Romanov V. V., Shneerson M. B. // Russian Geophysics Journal. — 2018. — No. 6. — P. 75–81 (in Russ.).
3. Turchkov A. M. Otlichitelnye osobennosti provedeniya rabot na prodolnykh i poperechnykh volnakh metodom otrazhennykh voln pri izuchenii verkhney chasti razreza [Specific features of reflection seismic surveys using P- and S-waves for near-surface investigations] / Turchkov A. M., Oshkin A. N., Zinovyev I. A. [et al.] // Engineering and Mining Geophysics — 2020: Proceedings of the Scientific and Practical Conference. — Perm, Russia, May 12–16, 2020. — Perm, 2020 (in Russ.).
4. Aki K. Quantitative seismology: theory and methods / Aki K., Richards P. G. — W. H. Freeman & Co. — 1980. — P. 162–178.
5. Dal Moro G. Surface Wave Analysis for Near Surface Applications / Dal Moro G. — Amsterdam: Elsevier, 2014.
6. Foti S. Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization / Foti S., Lai C. G., Rix G. J., Strobbia C. — Boca Raton: CRC Press, 2015.
7. Skvortsov A. G. Vysokorazreshayushchaya seysmorazvedka na poperechnykh volnakh (VSPV): fizicheskie osnovy, tekhnologiya i opyt primeneniya [High-resolution shear-wave seismic surveying (SWS): physical principles, technology and application experience] / Skvortsov A. G. // Engineering and Mining Geophysics — 2010: Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference and Exhibition. — Gelendzhik, 2010 (in Russ.).