

*В.В. Романов*

# О ВЫБОРЕ БАЗЫ ИЗМЕРЕНИЯ ГРАНИЧНОЙ СКОРОСТИ ПРЕЛОМЛЕННЫХ ВОЛН МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО В ИНЖЕНЕРНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ

## Введение

В инженерной сейсмозразведке традиционным источником получения информации о геолого-геофизическом строении верхней части разреза (ВЧР) являются преломленные волны, наблюдаемые в первых вступлениях [2, 4, 6]. Банк данных о распределении скоростей продольных и поперечных волн в ВЧР применяется в сейсмическом микрорайонировании (СМР) для уточнения интенсивности землетрясений на конкретных строительных площадках и вдоль трасс линейных сооружений [1]. Граничные скорости, находимые по годографам преломленных волн, имеют особую ценность из-за того, что они характеризуют верхние кромки отдельных слоев. Эффективные скорости, вычисляемые по годографам отраженных волн, относятся ко всей покрывающей толще и потому не могут быть привязаны к определенным интервалам разреза [7].

Обработка сейсмограмм с записью преломленных волн базируется на корреляции выбранной фазы импульса в ручном или полуавтоматическом режиме. В обоих случаях определенные времена вступления содержат случайные и систематические погрешности. Случайная составляющая полной погрешности возникает из-за ошибок установки меток корреляции, неоднородных поверхностных сейсмических условий, влияния случайных и регулярных помех. Систематическая погрешность связана с монотонно возрастающей временной задержкой между вступлением и последующими фазами импульса волн [9], интерференцией [8], эффектом проникания, ошибками в отождествлении фаз при транспозиционной корреляции [3]. Погрешности корреляции искажают теоретически прямолинейную форму годографа, что отрицательно сказывается на точности нахождения граничной скорости (рис. 1).

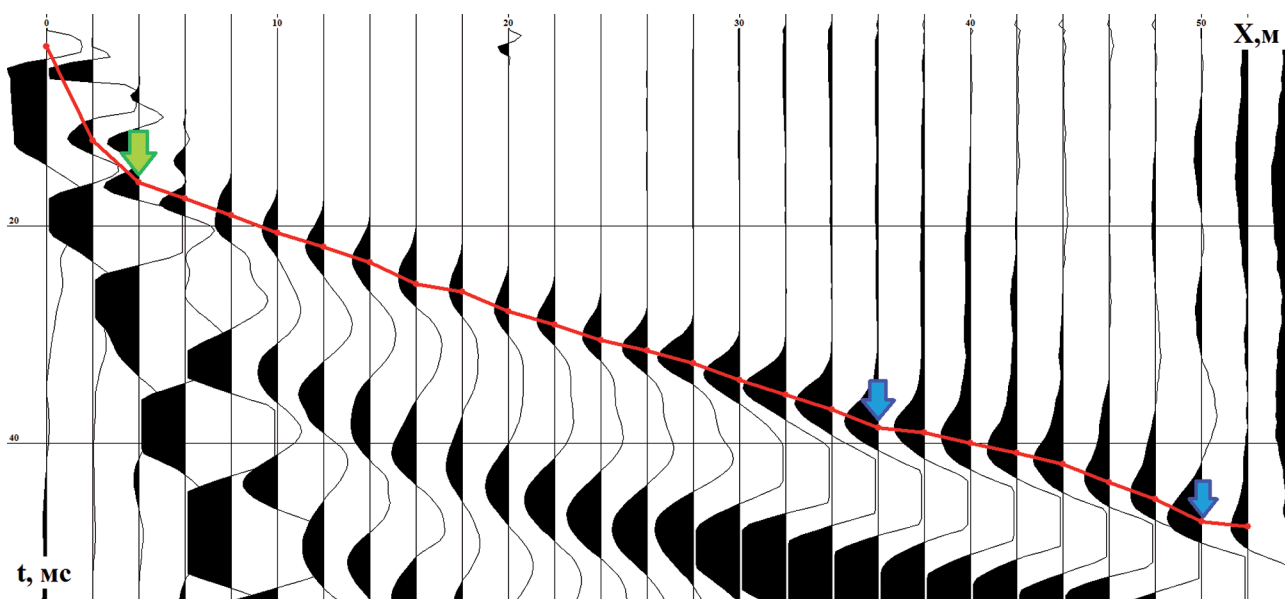


Рис. 1. Годограф первых вступлений.

Зеленой стрелкой показана точка излома, синими стрелками выделен интервал аномального уменьшения времени годографа

Возможность точного позиционирования меток корреляции на сейсмограммах ограничивается выбранным при регистрации данных шагом дискретизации. Величина случайной погрешности при корреляции волны определяется минимальным интервалом  $\pm \Delta t/2$ , где  $\Delta t$  – шаг дискретизации. Упомянутая величина имеет нормальный закон распределения (рис. 2).

Нахождение граничной скорости по годографу основывается на нахождении наклона участка годографа на некоторой базе измерения  $L$ . С уменьшением  $L$  точность вычисления граничной скорости снижается, так как падает устойчивость решения к случайной погрешности (рис. 3).

Цель предлагаемой работы заключается в установлении оптимальной базы измерения граничной

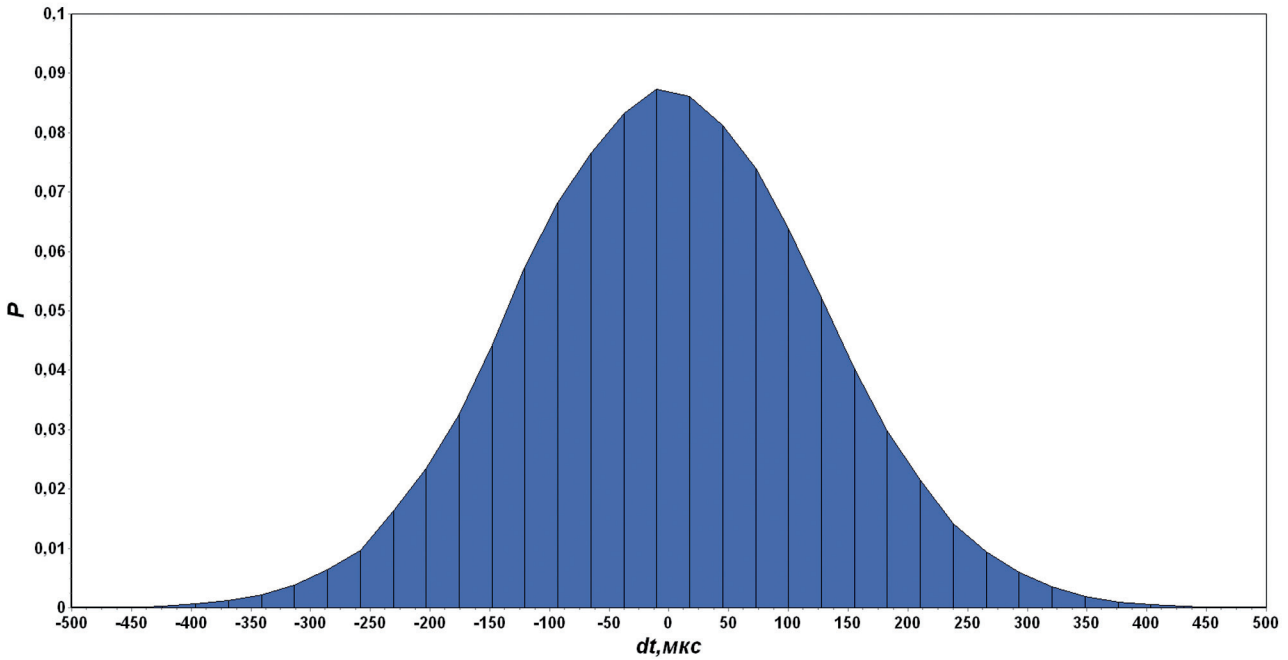


Рис. 2. Распределение погрешности корреляции преломленной волны при шаге дискретизации  $\Delta t = 1000$  мкс (1 мс)

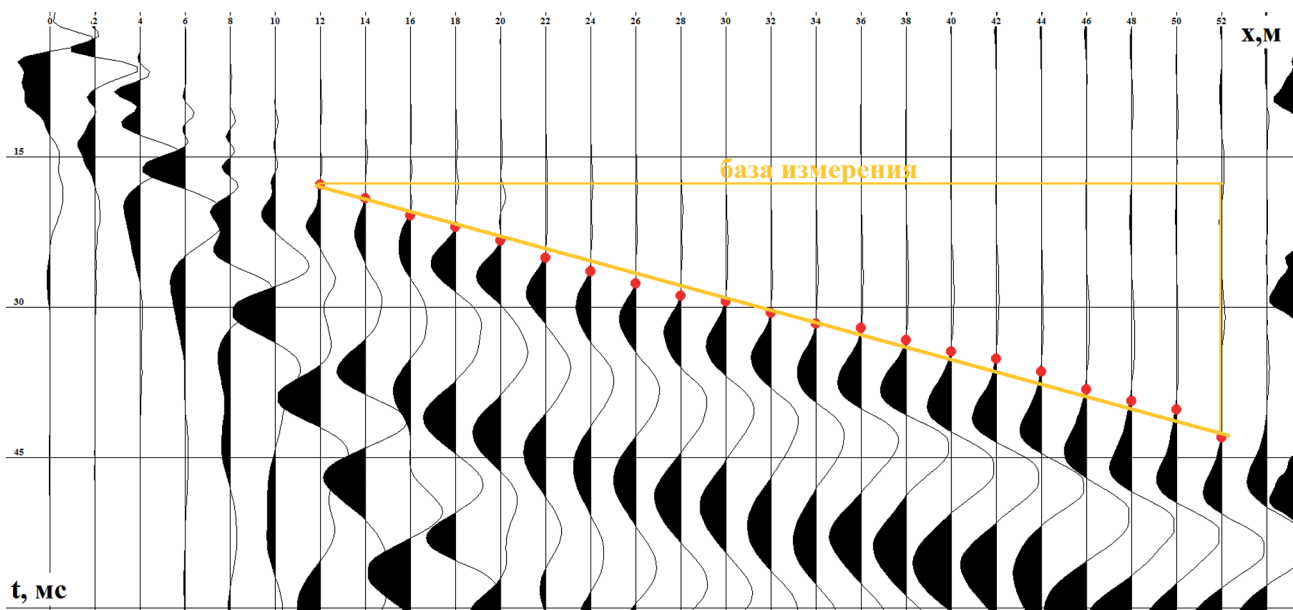


Рис. 3. База измерения граничной скорости. Точками показаны метки корреляции

скорости, в пределах которой погрешность не будет превышать допустимого предела в 10%. В абсолютном отношении указанная погрешность составляет 10-20 м/с для большинства горных пород верхней части разреза [4].

**Методика эксперимента**

Эксперимент основывается на формировании множества реализаций случайной функции  $t = x/V + \tau$ , образованной суммой годографа абсолютно регулярной волны со скоростью  $V$  и случайной величины, связанной с погрешностью корреляции. Математическое ожидание  $\tau$  было задано равным нулю, а СКО 3/2 от предполагаемого уровня неопределенности времени [11] вступления  $\Delta t$ , что обеспечивало доверительный интервал моделируемой погрешности  $\pm \Delta t$ . Расчет годографа производился при помощи стандартной функции *Rand G*, входящей в состав модуля *Math* среды программирования *Delphi*. Составленная автором статьи программа позволяет при помощи генератора псевдослучайных чисел с нормальным распределением формировать практически неограниченное число годографов и определять по ним кажущуюся скорость  $V_K$ . В случае горизонтальности преломляющей границы кажущаяся скорость равна граничной, поэтому выбранная модель в целом повторяет распределение времен реальных годографов преломленных волн.

Для вычисления скорости по конкретной реализации применялось два способа. В первом случае скорость находилась как обратная величина *отно-*

*сительного приращения* времени в крайних точках базы измерения  $L$  (1).

$$V_L = \frac{t_L - t_0}{L} \tag{1}$$

где  $V_L$  – оцениваемое значение скорости,  $t_L$  – значение времени на конце базы  $L$ ,  $t_0$  – время вступления в начале базы.

Второй способ базировался на нахождении наклона прямой  $K$ , аппроксимирующей годограф преломленной волны на базе по *способу наименьших квадратов* (2).

$$V_L = \frac{1}{K} \tag{2}$$

Погрешности определения скорости по двум способам накапливались и рассчитывалось среднее по всем опытам значение. При моделировании задавался диапазон случайных отклонений  $\Delta t$ , граничная скорость  $V$ , число срабатываний генератора случайных чисел  $M$  и длина базы  $L$ . Результаты были построены на графиках зависимости относительной погрешности нахождения граничной скорости  $\Delta V$  (3) от длины базы (рис. 4).

$$\Delta V = \frac{V_L}{V} 100\% \tag{3}$$

**Анализ полученных материалов**

В результате было установлено, что нахождение граничной скорости по способу (1) примерно в четыре раза больше, чем при использовании метода наименьших квадратов (рис. 4). Кроме того, анализ кривых позволил установить приемлемые базы оценки

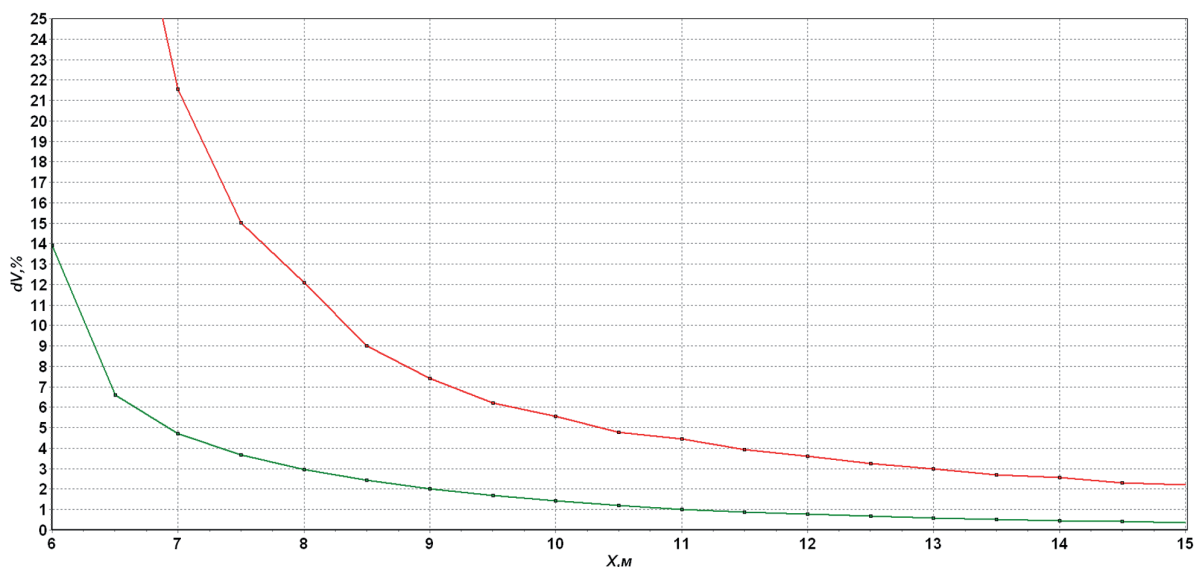


Рис. 4. Зависимость погрешности определения скорости от длины базы. Красная линия – по приращению участка годографа, зеленая – по методу наименьших квадратов

граничной скорости в зависимости от значения скорости и уровня неопределенности ( $\Delta t$ ) времен годографа относительно линейной зависимости, принятой за эталонную. Так, при  $V = 2000$  м/с и  $\Delta t = 2$  мс погрешность нахождения скорости в 10% по приращению годографа достигается на базе 7 м, методом наименьших квадратов – 5 м. С увеличением неопределенности времен годографа требуемая минимальная база растет, причем у метода приращений значительно быстрее (рис. 5). Также база должна быть увеличена при возрастании скорости.

Для оценки надежности полученных выводов был исследован годограф преломленной волны, полученный путем автоматической корреляции первых вступлений на сейсмограмме инженерной сейсморазведки [10]. Годограф был аппроксимирован отрезком прямой линии и

найжены невязки между практической и теоретической зависимостью (рис. 6). Значение невязки оказалось равным  $\pm 1,5$  мс, что определяет минимальную базу нахождения скорости в 5-7 м (рис. 5) в зависимости от применяемого метода.

По изображенному на рис. 6 годографу в скользящем окне размером 2-16 м были проведены измерения скорости по методу МНК и приращений. Результаты приведены на рис. 7. Базы 2 и 4 м оказались непригодными для оценки латерального изменения скорости, так как определяемая скорость случайным образом «плавала» в интервале  $\pm 10000$  м/с. Гладкие и достаточно устойчивые горизонтальные распределения скорости удалось получить лишь на базах 8-16 м. На первый взгляд, распределение граничной скорости, найденное методом приращения, более разрешено, однако подобия кривых, полученных на

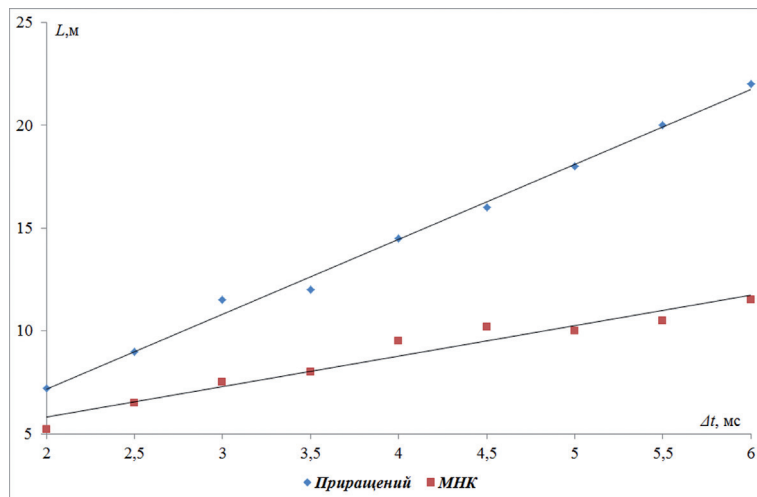


Рис. 5. Зависимости величины оптимальной базы нахождения граничной скорости от неопределенности времен годографа. Красные точки – метод наименьших квадратов, синие точки – метод приращений

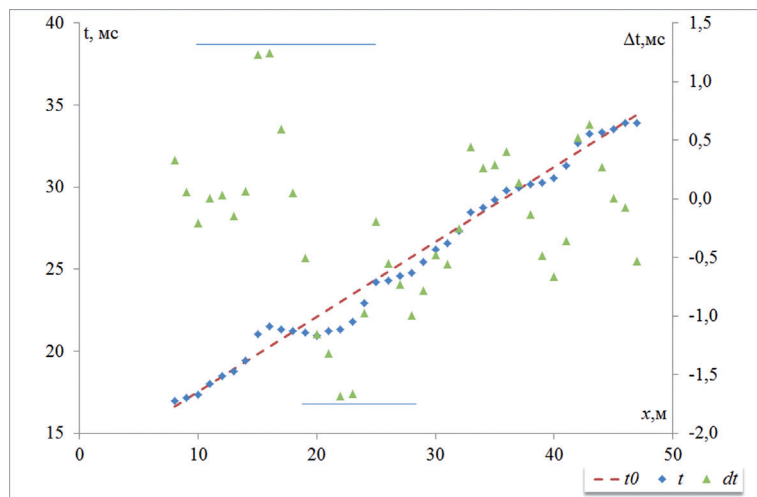


Рис. 6. Аппроксимация годографа преломленной волны линейной зависимостью. Синие точки – времена вступления наблюдаемого годографа, красная пунктирная линия – аппроксимация синие точки – метод приращений

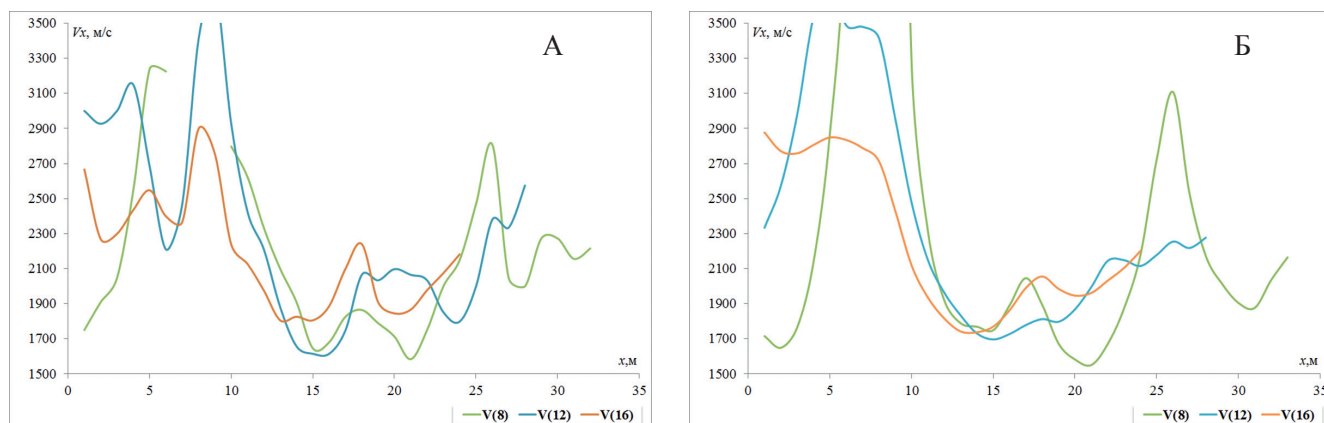


Рис. 7. Распределения скорости по профилю, полученные разными методами. А – с использованием метода приращений, Б – с использованием метода наименьших квадратов

близких базах, не наблюдается, что говорит о высокой погрешности измерений. Результаты использования МНК более представительны, распределения более гладкие и хорошо повторяют друг друга.

**Выводы**

Применение метода Монте-Карло позволило вывести эмпирическую зависимость между базой измерений граничной скорости и откликом годографа преломленной волны от прямой. Полученные результаты были уточнены путем нахождения распределений скорости в скользящем окне по профилю сейсморазведки. Совокупный анализ всех полученных выводов приводит к заключению о том, что в инженерной сейсморазведке распределения скорости имеет смысл получать на базе не менее 10-12 м. Более разрешенные распределения возможны только при кардинальном снижении погрешности корреляции.

**Ключевые слова:** инженерная сейсморазведка, метод преломленных волн, оценка граничной скорости, погрешность, метод Монте-Карло.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Воронков О.К., Ушакова Л.Ф., Шейкин А.М. Оценка сейсмогеологических условий участков эксплуатируемых гидротехнических сооружений на территории ставропольского края // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. – 2014. – № 273. – С. 45-54.
2. Крылатков С.М. и др. Сейсмические изображения геологической среды в методе преломленных волн // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2-24. – С. 5409-5415.
3. Миронов В.А., Карюкина А.А. Разработка алгоритма выявления низкоскоростной прослойки грунта в

более высокоскоростном слое в рамках метода преломленных волн для оценки сейсмической безопасности техноферных объектов // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Техника и технологии. – 2015. – Т. 8. – № 1. – С. 108-116.

4. Романов В.В. Применение амплитудных графиков при обработке и интерпретации данных метода преломленных волн для решения задач инженерной геологии // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2012. – № 4. – С. 56-60.
5. Романов В.В. Изучение толщи четвертичных отложений Подмосковья инженерной сейсморазведкой // Геофизика. – 2014. – № 3. – С. 41-48.
6. Романов В.В., Гапонов Д.А. Применение инженерной сейсморазведки при изучении грунтовых вод в глинистых грунтах // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Сер. Естественные науки. – 2014. – № 6 (184). – С. 52-59.
7. Романов В.В. Математическое моделирование при анализе данных метода отраженных волн в инженерной сейсморазведке // Геоинформатика. – 2014. – № 1. – С. 51-56.
8. Романов В.В. О возможности повышения разрешенности сейсмограмм метода преломленных волн (МПВ) // Технологии сейсморазведки. – 2013. – № 4. – С. 67-73.
9. Романов В.В. Особенности дифференцирования цифровых данных инженерной сейсморазведки // Геоинформатика. – 2014. – № 4. – С. 43-47.
10. Романов В.В., Рахматуллин И.И. Инженерная геофизика при изучении гляциальных отложений Дмитровского района Подмосковья // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2014. – № 3. – С. 86-88.
11. Руднев В.Н. Оценка точности годографов отраженных волн по разбросу значений эффективной скорости // Прикладная геофизика. – 1956. – №. 15.