

ГЕОФИЗИКА

МЕТОД ГИЛЬБЕРТ-СЭМБЛАНС. ОБРАБОТКА ДАННЫХ  
АКУСТИЧЕСКОГО КАРОТАЖА

Р.Д. Ахметсафин, В. Дубинский\*, Д. Паттерсон\*

ОАО НПП «Геофизика», 450005, Уфа, ул. 8 Марта, 12, Россия

\* Baker Hughes, P.O. Box 670968 (77267-0968), 2001 Rankin Road, Houston, Texas 77073, USA

Предложен метод обработки данных многоэлементного низкочастотного акустического каротажа, объединяющий достоинства известных методов сэмпланс и оценки фазовой скорости (помехоустойчивость первого и точность второго). В основу метода положен точечный (безоконный) сэмпланс по преобразованию Гильберта. Вводится понятие фазовый сэмпланс, позволяющее, наряду с оценкой меры когерентности распределения мощности между сигналами, оценивать и распределение фазового состояния. Также предложены метод предварительной, грубой оценки скоростных свойств породы по изменению групповой мощности сигналов и новые, более информативные, формы представления результатов обработки.

*Низкочастотный акустический каротаж, сэмпланс метод, преобразование Гильберта.*

HILBERT-SEMBLANCE METHOD FOR ACOUSTIC LOGGING DATA PROCESSING

R.D. Akhmetsafin, V. Dubinskii, and D. Patterson

We suggest a method of multielement low-frequency acoustic logging data processing, which combines advantages of the semblance and phase velocity processing (PVP) techniques, namely, the interference resistance in the former and better accuracy in the latter. The new method is based on point (windowless) semblance by the Hilbert transformation. The introduced concept of phase semblance makes it possible to estimate the signal power distribution semblance and the phase state. Also suggested are an algorithm for preliminary estimation of rock velocity properties from signal group power variations and improved forms of processed data imaging.

*Low-frequency logging, semblance method, Hilbert transformation*

ВВЕДЕНИЕ

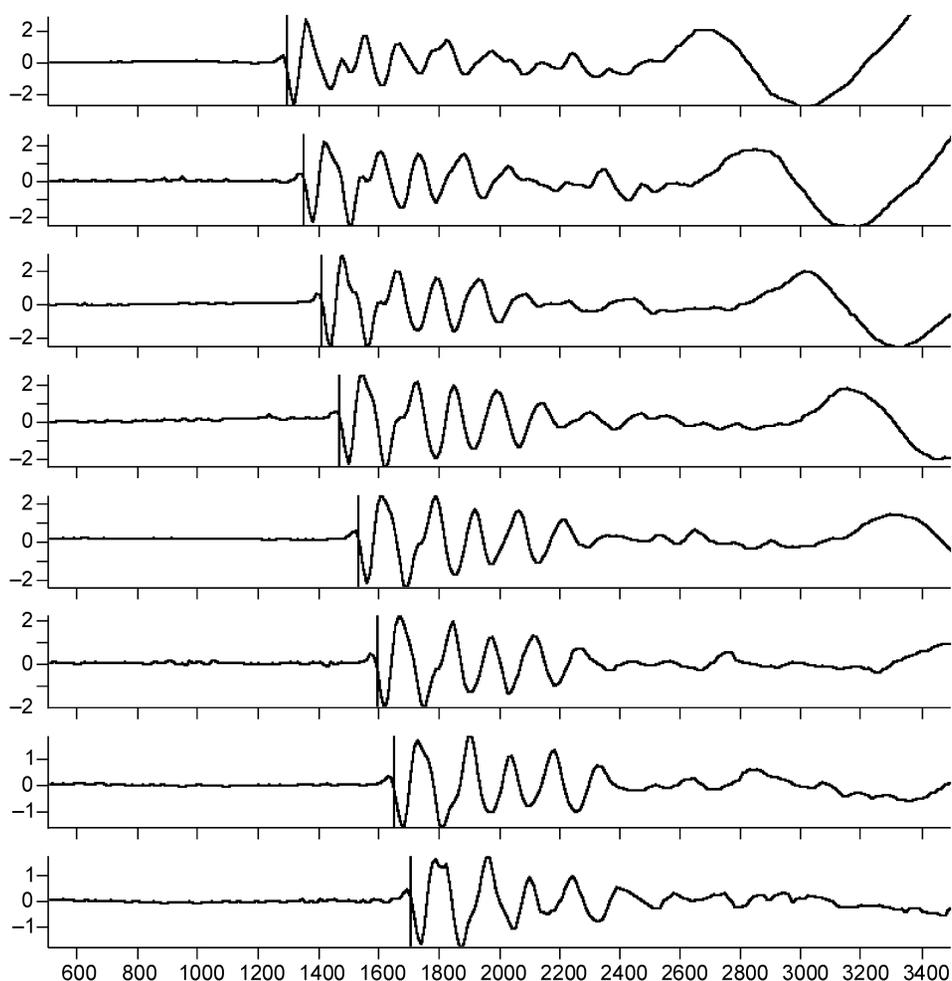
Для решения основной задачи первого этапа обработки данных акустических массивов — выделения первых вступлений и оценки скоростей составляющих волн — в настоящее время широко используются два метода: сэмпланс (semblance) и оценка фазовой скорости (Phase Velocity Processing technique — PVP).

Напомним кратко эти методы. Пусть имеется  $M$  приемников,  $TR$  — расстояние от излучателя до первого приемника,  $RR$  — расстояние между приемниками,  $f_m(t)$  — зарегистрированные данные на приемниках. В качестве примера рассматриваются данные прибора АК с восемью приемниками (рис. 1),  $z_m = TR + (m - 1) \cdot RR$  — расстояния от излучателя до приемников.

**Метод сэмпланс** [Kimball, Marzetta, 1984]. Сэмпланс — мера когерентности распределения мощности между сигналами в координатах

$$\text{Semb}(t, \Delta T) = \frac{\int_{t-\text{Window}}^{t+\text{Window}} \left\{ \sum_{m=1}^M f_m(z_m \Delta T + \tau) \right\}^2 d\tau}{\int_{t-\text{Window}}^{t+\text{Window}} \sum_{m=1}^M f_m^2(z_m \Delta T + \tau) d\tau}, \quad (1)$$

где  $\Delta T$  — интервальное время или величина, обратная скорости,  $t$  — время прибытия, Window — временное окно. Интегральное значение интервального времени  $\Delta T$  в пределах антенной решетки (с учетом записей всех приемников) как скоростная характеристика волны по породе определяется, как правило, по максимальным оценкам Semb в некоторой области аргументов  $t$  и  $\Delta T$ . В более широком смысле



**Рис. 1. Сигналы по приемникам.**

Ось  $X$ —время, мкс, ось  $Y$ —амплитуда, мВ.

термин «сэмбланс» предлагается трактовать как меру подобия оценок сигналов приемников, приведенную к интервальному времени.

**Метод оценки фазовой скорости** [Kozak et al., 2001]. Для сигнала от каждого приемника оценивается текущее фазовое состояние

$$\Phi_m(t) = \arctan \left( \frac{H[f_m(t)]}{f_m(t)} \right),$$

где  $H[f_m(t)]$  — преобразование Гильберта

$$H[f(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(\theta)}{t - \theta} d\theta.$$

Необходимо также сохранить непрерывность по  $\pi$ -границам из-за области определения функции  $\arctan$ . Затем распределение интервального времени—медленность во временной области для каждой пары приемников рассчитывается как

$$S_{i,j}(t) = \frac{[\Phi_i^{-1}(t) - \Phi_j^{-1}(t)]}{z_j - z_i}. \quad (2)$$

Само значение  $\Delta T$  между приемниками вычисляется по заданному интервалу времени пробега усреднением уравнения (2):

$$\Delta T_{i,j} = \frac{\sum S_{i,j}(t)}{t_{\max} - t_{\min}}.$$

Интегральное значение  $\Delta T$  определяется дальнейшим усреднением по приемникам.

Оба метода имеют свои преимущества и недостатки. Первый имеет более высокую помехоустойчивость, но более низкую точность, второй — наоборот. Различия методов особенно проявляются при малом числе приемников (4 и менее). При этом пик сэмпла размыт, а выборка для интегральных оценок мала. Кроме того, в обоих методах крайне важно удачно выбрать временное окно.

### ИНТЕГРАЦИЯ МЕТОДОВ

Авторы предлагают новый метод, названный Гильберт-сэмбланс (Hilbert Semblance Method — HSM), объединяющий достоинства обоих методов.

Формулу (1) предлагается записать с применением преобразования Гильберта как

$$\text{Semb}(t, \Delta T) = \frac{\left| \sum_{m=1}^M H^* [f_m(z_m \Delta T + t)] \right|}{\sum_{m=1}^M |H^* [f_m(z_m \Delta T + t)]|}, \quad (3)$$

где  $H^*[f(t)] = f(t) + jH[f(t)]$ .

Эта формула, на наш взгляд, более корректно передает содержание понятия когерентности мощности. Следует обратить внимание, что нет необходимости подбирать временное окно, хотя в сильно «зашумленных» случаях можно применять и оконную оценку

$$\frac{1}{\text{Window}} \int_t^{t + \text{Window}} \text{Semb}(\tau, \Delta T) d\tau.$$

Формуле (3) можно придать более изящный и законченный вид. Из отдельных измерений  $f_m(t)$  построим пространственно-временную функцию регистрируемых данных на каждой отметке глубины  $f(t, z)$ , где  $z$  — измерение по длине прибора. Рассмотрим теперь интеграл

$$R(t, \Delta T) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t + z \Delta T, z) dz.$$

Этот интеграл соответствует известному преобразованию Радона [Виленкин и др., 1964], поэтому формулу (3) можно переписать как

$$\text{Semb}(t, \Delta T) = \frac{|H^*[\Re\{f(t, z)\}]|}{\Re\{|H^*[\Re\{f(t, z)\}]\}} = \frac{|B^*(t, \Delta T)|}{A(t, \Delta T)} = \frac{B(t, \Delta T)}{A(t, \Delta T)}. \quad (4)$$

В результате при численной реализации также получаем матрицу (рис. 2) (здесь и далее время прибытия приведено к дальнему приемнику). Отметим, что преобразование Радона является обратимым, что позволяет осуществлять фильтрацию исходных сигналов в области время прибытия—интервальное время. Знаменатель  $A$  отражает общую, а числитель  $B$  — когерентную мощности сигналов, приведенные к интервальному времени (рис. 3).

Введем понятие фазовый сэмпла

$$\Phi(t, \Delta T) = \arctan\left(\frac{\text{Im } B^*(t, \Delta T)}{\text{Re } B^*(t, \Delta T)}\right), \quad (5)$$

по которому можно отследить групповое изменение фазы. Для анализа нет необходимости «накручивать»  $\pi$ -границы для достижения непрерывности фазы, как в RVP. Так как для выделения первого вступления нас интересуют только переходы фаз (например с плюса на минус), то такое представление с учетом веса (4) имеет вид взвешенных фазовых траекторий (рис. 4).

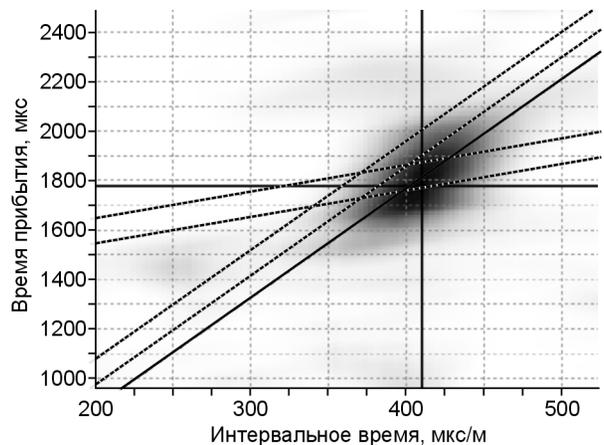


Рис. 2. Гильберт-сэмбланс метод.

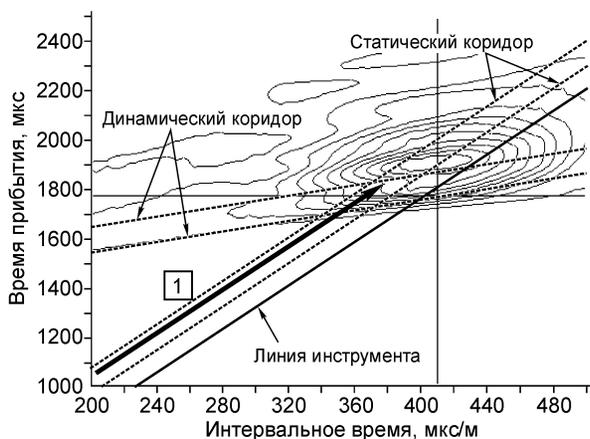


Рис. 3. Когерентная мощность.

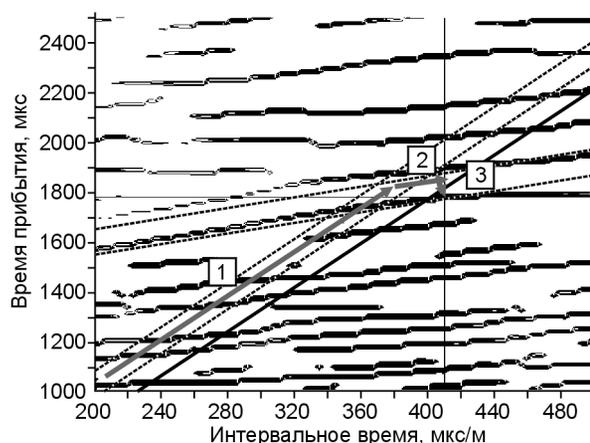


Рис. 4. Сэмбланс фазовых переходов с плюса на минус.

$$\text{Semb}_{\pm}(t, \Delta t) = \text{Semb}(t, \Delta t) \cdot \Phi_{\pm}(t, \Delta t), \quad (6)$$

где  $\Phi_{\pm}$  — бинарная матрица фазовых переходов, их нетрудно определить по  $\pi$ -границам. Уточним, что для поиска фазовых переходов (именно с плюса на минус) при применении функции ATAN2 удобнее использовать вместо (5) все-таки

$$\Phi(t, \Delta T) = \text{ATAN2}(-\text{Re } B^*(t, \Delta T) - \text{Im } B^*(t, \Delta T)).$$

В свою очередь, ограничения на время прохождения волны в скважинном флюиде плюс длина полуволны («ловим» начало более различимой второй полуволны)  $ht_{\min}$  и  $ht_{\max}$  всегда существуют и могут быть оценены из величин диаметров ( $D$ ) скважины, прибора и интервального времени в жидкости

$$ht = (D_{\text{скважины}} - D_{\text{прибора}}) \cdot \Delta T_{\text{ж}} + t_{\text{полуволны}}.$$

Таким образом, динамический коридор, ограничивающий решение  $t$ , может быть определен как

$$t_{\min/\max}(\Delta T) = TR \cdot \Delta T_{TR} + (M - 1) \cdot RR \cdot \Delta T + ht_{\min/\max}, \quad (7)$$

где  $\Delta T_{TR}$  — оценка интервального времени на интервале от излучателя до первого приемника, которую можно получить по уже вычисленным значениям  $\Delta T$ , либо воспользоваться алгоритмом, представленным ниже. Коридор позволяет локализовать поиск решения и снизить вычислительные затраты.

Матрицы  $\text{Semb}$ ,  $\text{Semb}_{\pm}$  и  $B$  позволяют более точно и корректно оценивать как интервальное время, так и первое вступление. Мы предполагаем, что точка HSM, определяющая оптимальное решение в области антенной решетки  $[t_R, \Delta T_R]$ , лежит на одной из линий (например, для головной или  $P$ -волны, как правило, первой снизу) фазовых траекторий (6) (см. рис. 3), ограниченной коридором  $t_{\min/\max}$ , для которой выполняется условие

$$\max \text{Semb}(t, \Delta T). \quad (8)$$

Для отображения матриц по глубине на геофизических планшетах, мы предлагаем строить их проекции с учетом найденных решений. Первая — это проекция  $\text{Semb}$  на ось интервальное время в виде коррелограммы отображается в координатах глубина—интервальное время (рис. 5, а)

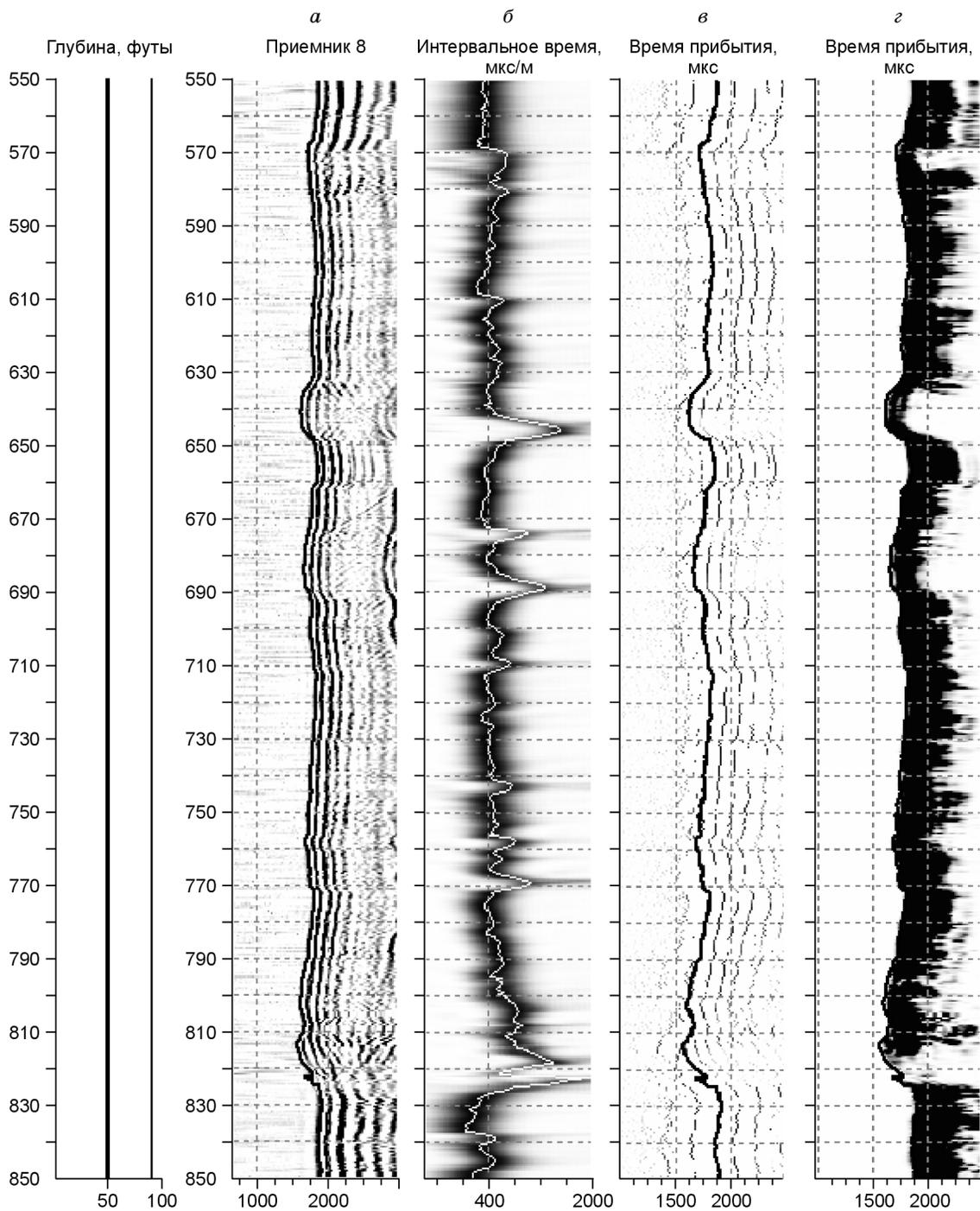
$$R_1(\Delta T) = \max_{t_{\min} \leq t \leq t_{\max}} \text{Semb}(t, \Delta T),$$

вторая — проекция  $\text{Semb}_{\pm}$  на ось время прибытия отображает фазовые траектории в координатах глубина—время прибытия (см. рис. 5, б)

$$R_2(t) = \text{Semb}_{\pm}(t, \Delta T_R),$$

третья — проекция  $B$  на ось время прибытия отображает нарастание когерентной мощности в координатах глубина—время прибытия (см. рис. 5, в)

$$R_3(t) = \frac{1}{M} B(t, \Delta T_R).$$



**Рис. 5. Проекция метода.**

*a* — ФКД по восьмому приемнику, *б* — проекция сэмплов и интервальное время, *в* — проекция фазовых переходов и время прибытия, *г* — проекция когерентной мощности и время прибытия.

Мы предлагаем следующий алгоритм локализации решений 1—3.

1. Для начальной, грубой оценки  $\Delta T_{TR}$  мы предлагаем использовать следующую проекцию на ось время прибытия

$$R_4(t) = \frac{1}{M} \max_{\Delta T_{\min} \leq \Delta T \leq \Delta T_{\max}} B(t, \Delta T) > \delta,$$

где  $\delta$  — некоторое пороговое значение мощности, которое предварительно подстраивается, а при вычислении коридора  $\Delta T_{\min/\max}$  принимаем  $\Delta T_{TR} = \Delta T$  (статический коридор)

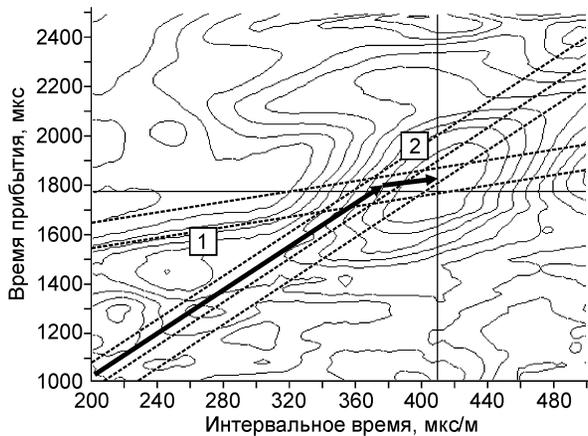


Рис. 6. Гильберт-сэмпланс на отметке 670 футов.

$$\Delta T_{\min/\max}(t) = \frac{t - ht_{\max/\min}}{TR + (M - 1) \cdot RR}$$

По отсечке мощности внутри этого более крутого коридора мы определяем некоторое приближение решения для интервала излучатель—первый приемник  $[t_{TR}, \Delta T_{TR}]$ , которое считаем вполне достаточным для последующего нахождения  $[t_R, \Delta T_R]$  (см. рис. 3).

2. Формируем коридор (7) и по (8) определяем  $[t_R, \Delta T_R]$  (см. рис. 6).

3. Корректируем  $t_R$  по ближайшему фазовому переходу с предпочтением по уровню отсечки мощности (см. рис. 4).

4. Если исходный материал позволяет (степень зашумленности данных), учитывая полученные оценки  $[t_R, \Delta T_R]$ , являющиеся интегральными в пределах антенной решетки, можно воспользоваться РВП для более детального исследования скоростных свойств породы. Можно также применить предложенный метод по парам приемников, что окажется более эффективным из-за более высокой помехоустойчивости.

На рис. 5, 7 представлен пример обработки данных прибора АК по тонкослоистому разрезу (глубина показана в футах). Расстояние от излучателя до первого приемника  $TR = 3.35$  м (11 футов), расстояние между приемниками  $RR = 0.15$  м (0.5 фута). Интервальное время вычисляется в мкс/м. На рис. 4, 6

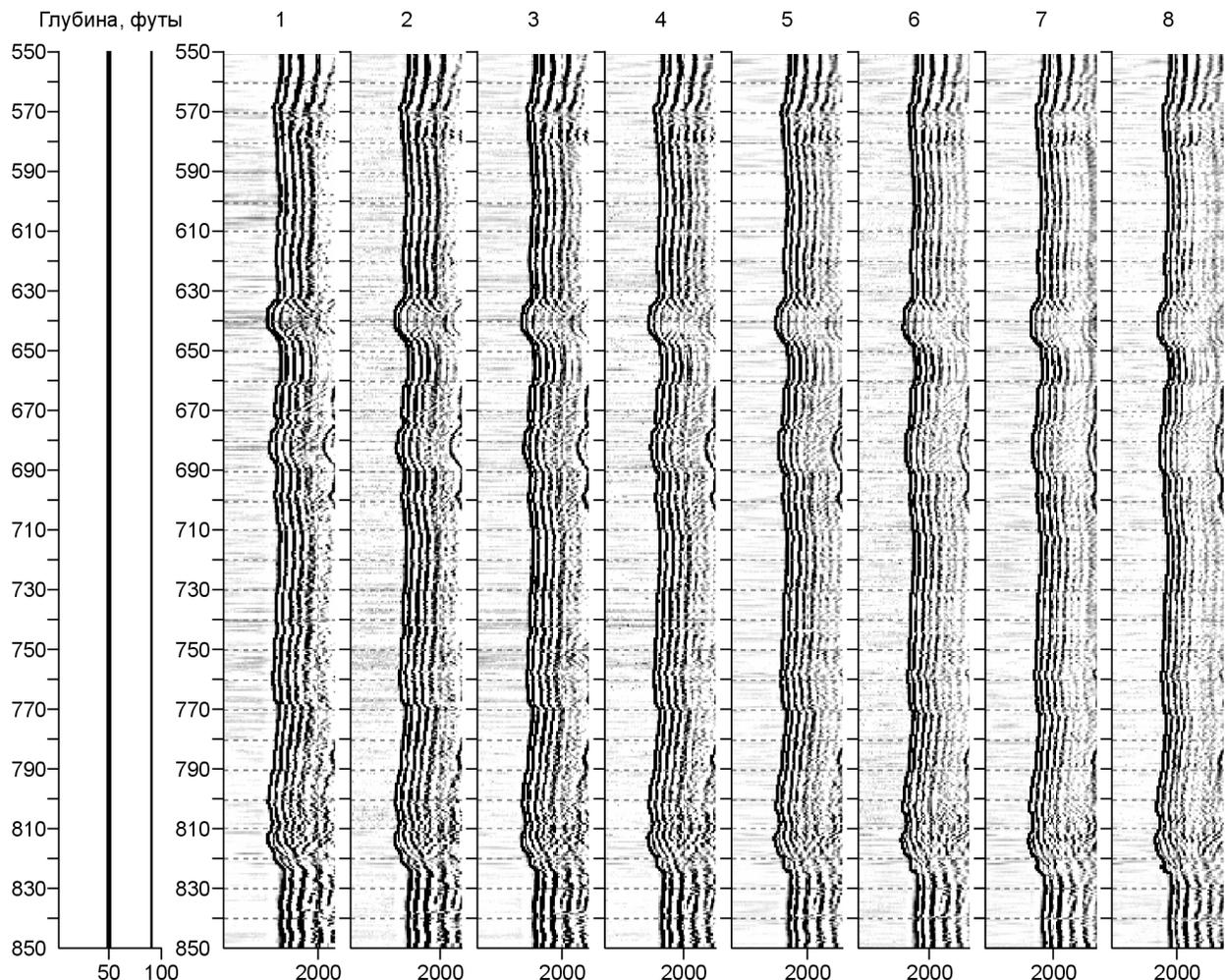


Рис. 7. Результат обработки. Первоприбытие по приемникам (1—8).

представлены исходные данные и результаты для отметки 670 футов, где  $\Delta T_{TR}$  меньше  $\Delta T_R$  (которая составляет 410 мкс/с) примерно на 40 мкс/с, поэтому решение сместилось даже ниже так называемой линии инструмента  $(\Delta T) = (TR + (M - 1) \cdot RR) \cdot \Delta T$ .

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый перспективный метод оценки скоростных свойств породы по данным низкочастотного акустического каротажа, объединяющий достоинства как метода сэмпланс, так и метода оценки фазовой скорости.

#### ЛИТЕРАТУРА

**Виленкин Н.Я., Горин Е.А., Костюченко А.Г., Красносельский М.А., Крейн С.Г., Маслов В.П., Митягин Б.С., Петунин Ю.И., Рутицкий Я.Б., Соболев В.И., Стеценко В.Я., Фаддеев Л.Д., Цитланадзе Э.С.** Справочная математическая библиотека. Функциональный анализ / Ред. С.Г. Крейн. М., Наука, 1964, 424 с.

**Kimball C. V., Marzetta T. L.** *Semblance. Processing of Acoustic Array Data* // *Geophysics*, 1984, v. 49, № 3, p. 274—281.

**Kozak M., Boonen P., Siefert D.** *Phase velocity processing for acoustic logging-while-drilling full waveform data* // *Trans. Soc. Prof. Well-Log Analysts*, 2001, 12 p.

*Рекомендована к печати 26 декабря 2007 г.  
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию  
3 октября 2007 г.*