

Гриценко С.А.

Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского (ФГБУ «ВСЕГЕИ»), Санкт-Петербург, Россия, Gritsenko1@yandex.ru

Егорова Н.В.

Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ), Санкт-Петербург, Россия, Egorovanatalia@gmail.com

К ВОПРОСУ О СЕЙСМОСТРАТИГРАФИИ, МУЛЬТИФОКУСИРОВАНИИ И ИНТЕРПОЛЯЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ РАЗРЕЗОВ (МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР)

Предлагается математический обзор алгоритмов нового представления сейсмогеологических разрезов. Обсуждаются методы построения сейсмостратиграфических разрезов и основанные на них новые способы мультифокусирования разрезов и интерполяции сейсмических и скважинных данных. Предполагается, что обсуждаемые алгоритмы помогут автоматизировать большую часть ручного труда при прослеживании горизонтов и представить сейсмические данные в форме, максимально приближенной к пониманию геологического строения.

Ключевые слова: *обработка и интерпретация сейсмических данных, мультифокусирование разрезов, сейсмостратиграфические разрезы, скважинные данные, интерполяция временных разрезов.*

Введение

Понятие «непрерывная сейсмостратиграфическая модель» предложено В.В. Лапковским (2012). Авторами данная модель рассматривается как разновидность сейсмического разреза, являющегося двумерной функцией, зависящей от расстояния и времени (либо глубины). В отличие от обычного разреза, где изолинии такой функции – это изолинии физических параметров (амплитуда, интенсивность, частота, затухание и пр.), в сейсмостратиграфическом разрезе изолиниями являются линии времён отражений.

При построении непрерывных сейсмостратиграфических разрезов используется алгоритм автоматической корреляции скважин для сейсмических трасс [Лапковский, 2012]. Другой способ предложен S. Fomel (2010), где данные разрезы рассматриваются как разрезы *относительного геологического времени* («relative geologic age» в терминологии T.J. Stark, 2003), а их построение осуществляется с помощью метода «plane-wave destruction» [Claerbout, 1992]. Авторами предлагаются иные методы расчёта сейсмостратиграфических разрезов: метод «Сферическое зеркало» [Гриценко, 2014] и предлагаемый авторами метод «Плоское зеркало».

Во всех рассмотренных выше методах построение сейсмостратиграфического разреза опирается на расчёт кривых времён отражений. Вдоль этих кривых можно выполнять

суммирование, то есть осуществлять мультифокусирование разрезов с учётом кинематики отражений. Такое суммирование авторами называется *сейсмостратиграфическим суммированием*.

Помимо суммирования вдоль изолиний сейсмостратиграфического разреза может быть выполнена линейная интерполяция амплитуд, динамических параметров, скважинных данных и пр. Ниже рассматривается такая интерполяция, названная *сейсмостратиграфической интерполяцией*.

Теоретические основы

Пусть задано параметрическое семейство кривых $\tau(x, \theta)$ в плоскости (x, τ) . Параметр θ определяет кривую $\tau(x)$ в параметрическом семействе кривых¹. Данное параметрическое семейство кривых порождает двумерную функцию $\theta(x, \tau)$, значениями которой являются значения параметра θ , а изолиниями - кривые $\tau(x)$. Верно и обратное: двумерная функция $\theta(x, \tau)$ определяет параметрическое семейство кривых $\tau(x, \theta)$ как семейство изолиний этой функции².

Если параметрическим семейством кривых $\tau(x, \theta)$ будут времена отражений от сейсмических границ на временном разрезе, то порождаемая им двумерную функцию $\theta(x, \tau)$ называется «*сейсмостратиграфический разрез*». Из этого определения следует, что для расчёта значения сейсмостратиграфического разреза в каждой его точке (x, τ) необходимо найти кривую отражения $\tau(x)$ из параметрического семейства кривых $\tau(x, \theta)$, проходящую через эту точку. Параметр θ такой кривой в параметрическом семействе и будет значением сейсмостратиграфического разреза в этой точке.

Во всех способах расчёта сейсмостратиграфических разрезов, перечисленных во введении, расчёт кривой отражения, проходящей через заданную точку разреза выполняется на основе предварительного расчёта *приращений времени отражения* в каждой точке разреза³. Под приращениями времени отражения $\Delta T(x_i, \tau)$ в точке разреза (x_i, τ) здесь понимается изменение времени отражения при переходе «вперёд» от трассы x_i к следующей трассе x_{i+1} . В общем случае существуют два приращения времени в точке (x_i, τ) . Второе связано с изменением времени при переходе к предыдущей трассе «назад» x_{i-1} . Они различаются

¹В дифференциальной геометрии параметрическое семейство плоских кривых определяется уравнением: $F(x, \tau, \theta) = 0$.

²Параметрическое семейство фронтов волн порождает функцию эйконала или поле времён от одного источника. И наоборот, поле времён определяет фронты волн. Важно, какую функцию порождает семейство лучей ортогональных фронтом.

³Расчёт сейсмостратиграфических разрезов (разрезов относительного геологического времени) в спектральной области на основе изменения мгновенных фаз рассматривается в работе Т.Д. Stark (2003).

верхним индексом Δ : $\Delta^-T(x_i, \tau)$ и $\Delta^+T(x_i, \tau)$.

После расчёта приращений времени отражения во всех точках разреза кривая $\tau(x)$, проходящая через заданную точку разреза, находится с помощью двух итеративных соотношений:

$$\tau(x_{i+1}) = \tau(x_i) + \Delta^+T(x_i, \tau) \quad (1).$$

$$\tau(x_{i-1}) = \tau(x_i) + \Delta^-T(x_i, \tau)$$

Ниже рассмотрены четыре способа расчёта приращений времён отражений.

1. Приращения времен отражений рассчитываются на основе мер сходства соседних трасс [Лапковский, 2012], для вычисления которых «используются модифицированные меры, достаточно давно применяемые в автоматических алгоритмах стратиграфической корреляции разрезов скважин [Вистелиус, 1962; Губерман, 1972], основанные на вычислении квадрата расстояния между двумя функциями (значения каротажных кривых) в оцениваемом интервале времени или глубины и взвешенный коэффициент корреляции значений этих функций в интервале».

2. Согласно S. Fomel (2007) расчёт приращений времен отражений является следствием решения дифференциального уравнения для плоских волн:

$$u_x + \sigma u_t = 0 \quad (2).$$

Здесь и далее нижним буквенным индексом обозначена операция дифференцирования, $u(x, t)$ – волновое поле разреза, σ – локальный наклон отражения в точке (x, t) [Claerbout, 1992]. Из уравнения (2) можно найти приращения времен отражений:

$$\Delta^+T(x_i, \tau) = -\sigma \cdot \Delta \quad (3),$$

$$\Delta^-T(x_i, \tau) = \sigma \cdot \Delta$$

где Δ – расстояние между соседними трассами разреза.

Как следует из (2) $\sigma = -u_x/u_t$ ¹.

3. Метод «Сферического зеркала» [Гриценко, 2014] также позволяет рассчитать приращение времен отражений. Данный метод является аналогом методам CRS [Jäger, 2001] и Multifocusing [Gelchinsky, 1999] для временных разрезов. В методе «Сферическое зеркало» вычисляются разрезы наклонов α и кривизн k сферических отражателей путём максимизации функционала от них когерентной меры Semblance [Taner, 1969]. По таким разрезам

¹ В работе S. Fomel (2010) отмечено, что вычисление приращения времени отражения выполняется «оптимизацией наименьших квадратов» (least-squares optimization). При этом используется «shaping regularization» [Fomel, 2007].

рассчитывается новый «разрез сферического зеркала» (рис. 1)¹. По этим же разрезам можно рассчитать разрезы приращений времен отражения:

$$\Delta^+ T(x_i, \tau) = \frac{4}{V} \frac{k\Delta^2 - q\Delta \cos(\alpha)}{\sqrt{4k^2\Delta^2 - 4qk\Delta \cos(\alpha) + q^2} + q} \quad (4).$$

$$\Delta^- T(x_i, \tau) = \frac{4}{V} \frac{k\Delta^2 + q\Delta \cos(\alpha)}{\sqrt{4k^2\Delta^2 + 4qk\Delta \cos(\alpha) + q^2} + q}$$

Здесь $q = kV\tau + 2$, V – скорость, Δ – расстояние между трассами разреза².

4. Разрезы приращения времени отражения можно найти по наклонам отражений. Предположим, что волновое поле $u(x, t)$ отдельного отражения на временном разрезе локально представимо в виде:

$$u(x, t) = f(x)g(t - \tau(x)) \quad (5).$$

Здесь $g(t)$ – форма сигнала отражения, $f(x)$ – амплитуда сигнала в точке наблюдения x , $\tau(x)$ – время прихода отражённой волны в точке (x, t) . После дифференцирования (5) по x и t получим:

$$u_x = f_x g - f g_t \tau_x \quad (6),$$

$$u_t = f g_t \quad (7),$$

$$u_{xt} = f_x g_t - f g_{tt} \tau_x \quad (8),$$

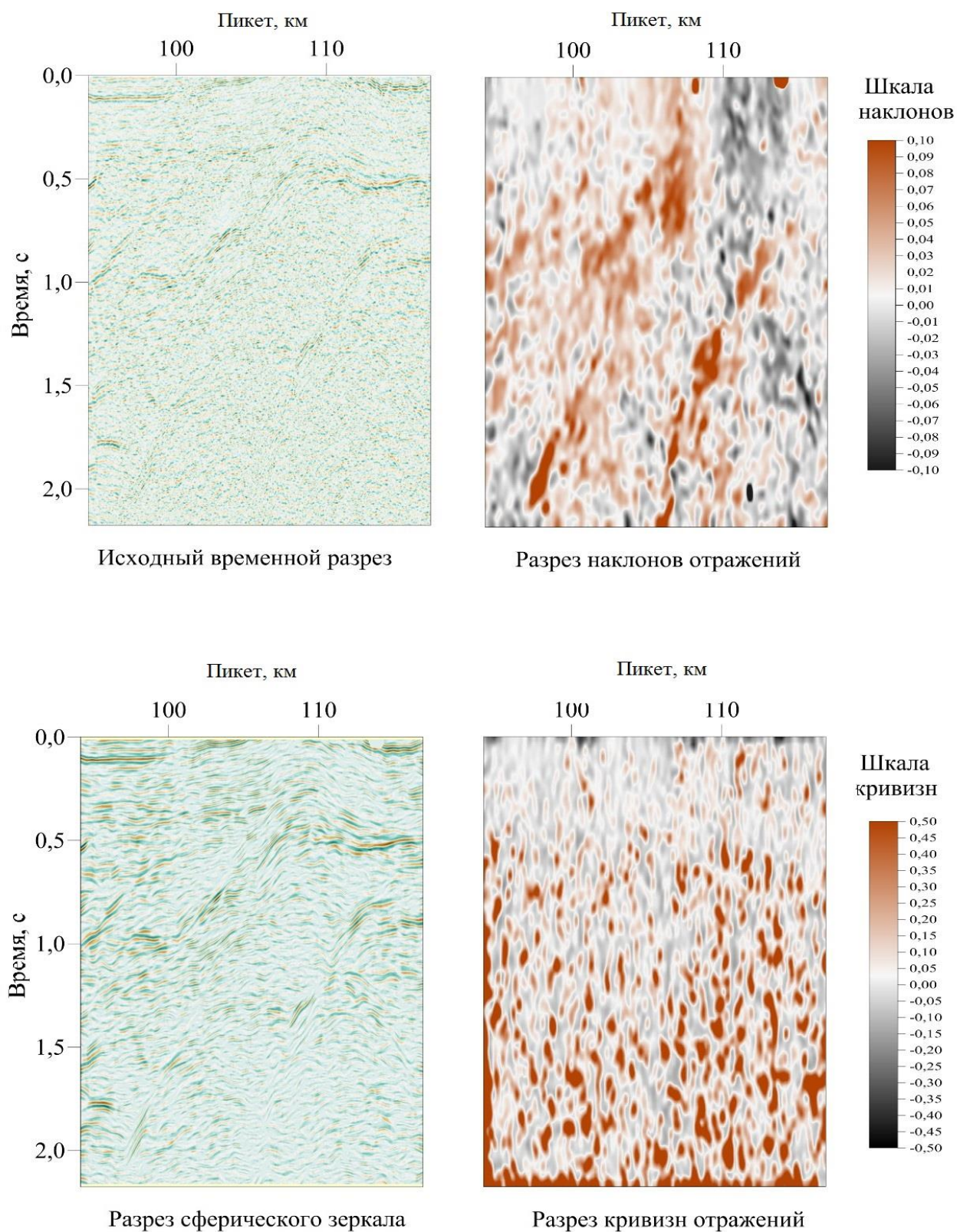
$$u_{tt} = f g_{tt} \quad (9).$$

Решая пять уравнений (5–9) относительно пяти неизвестных f , f_x , g , g_t , g_{tt} получаем, что $\tau(x)$ удовлетворяет обыкновенному дифференциальному уравнению [Гриценко, 2014]:

$$\tau_x = \frac{u u_{xt} - u_x u_t}{u_t u_t - u u_{tt}} \quad (10).$$

¹ Все расчёты для рисунков выполнены в системе обработки и интерпретации сейсмических данных CubeTechnology.

² Регуляризация в этом методе происходит за счёт размера окна по x и τ вдоль кривой отражения $\tau(x)$ при вычислении когерентной меры *Semblance*. Для небольших окон, как показывает практика, следует выполнить площадные медианное сглаживание, а затем сглаживание по среднему разрезов наклонов и кривизн.

**Рис. 1. Метод «Сферического зеркала»**

Будем считать, что расчёт наклонов кривых отражений по (10) выполняется *методом*

«Плоского зеркала»¹. Показательно, что с помощью подстановки:

$$v = \frac{u_t}{u} \quad (11),$$

соотношение (10) преобразуется к виду:

$$\tau_x = \frac{v_x}{v_t} \quad (12).$$

Учитывая, что $v = (\ln(u))_t$, можно также переписать (10) в виде:

$$\tau_x = \frac{(\ln(u))_{tx}}{(\ln(u))_{tt}} \quad (13).$$

Формулы для приращения отражений в методе «Плоского зеркала» имеют вид:

$$\Delta^+ T(x_i, \tau) = \tau_x \cdot \Delta \quad (14).$$

$$\Delta^- T(x_i, \tau) = -\tau_x \cdot \Delta$$

Сравнивая данные формулы с формулами приращения отражений (3) [Fomel, 2010], авторы заключают, что в обоих случаях используются только наклоны отражений, в отличие от приращения отражений (4) в методе «Сферического зеркала», где используется и кривизна отражений. Кроме того, для вычисления наклонов σ у S. Fomel, как следует из (2), необходимы только первые производные волнового поля разрезов $\sigma = -u_x/u_t$, тогда как в методе «Плоского зеркала» необходимы значения, первые и вторые производные этого поля (14). Это связано с тем, что в локальной модели волнового поля плоского отражателя (5) подразумевается изменение амплитуды сигнала $f(x)$ по x в отличие от модели (2). В этом легко убедиться подставив (5) в (2) с использованием выражений для первых производных (6) и (7)².

Примеры расчёта разрезов приращения времен отражений по методам «Сферического зеркала» и «Плоского зеркала» приведены на рис. 2.

Алгоритм расчёта *сейсмостратиграфических разрезов* заключается в следующем: значение *сейсмостратиграфического разреза* в точке (x, τ) определяется с помощью расчёта кривой $\tau(x)$ (начиная с этой точки). Расчёт кривой производится переходом от трассы к трассе с помощью итеративных соотношений (1), в которых, в зависимости от способа расчёта приращений отражений, используется (3), или (4), или (14). После нахождения кривой отражения $\tau(x)$ рассчитывается её параметр θ в параметрическом семействе кривых на основе её привязки к временному разрезу или сопутствующим ему данным. Параметр θ и является значением *сейсмостратиграфического разреза* в точке (x, τ) . В настоящей работе

¹При вычислениях τ_x по (10), в связи с неопределённостью при делении на 0, необходимо площадное медианное сглаживание, а затем сглаживание по среднему.

²Поскольку волновое поле отражателя (5) не удовлетворяет уравнению плоских волн (2), то важен вопрос: какому же уравнению оно удовлетворяет?

предлагаются четыре варианта определения параметра θ для рассчитанной по (1) кривой отражения $\tau(x, \theta)$.

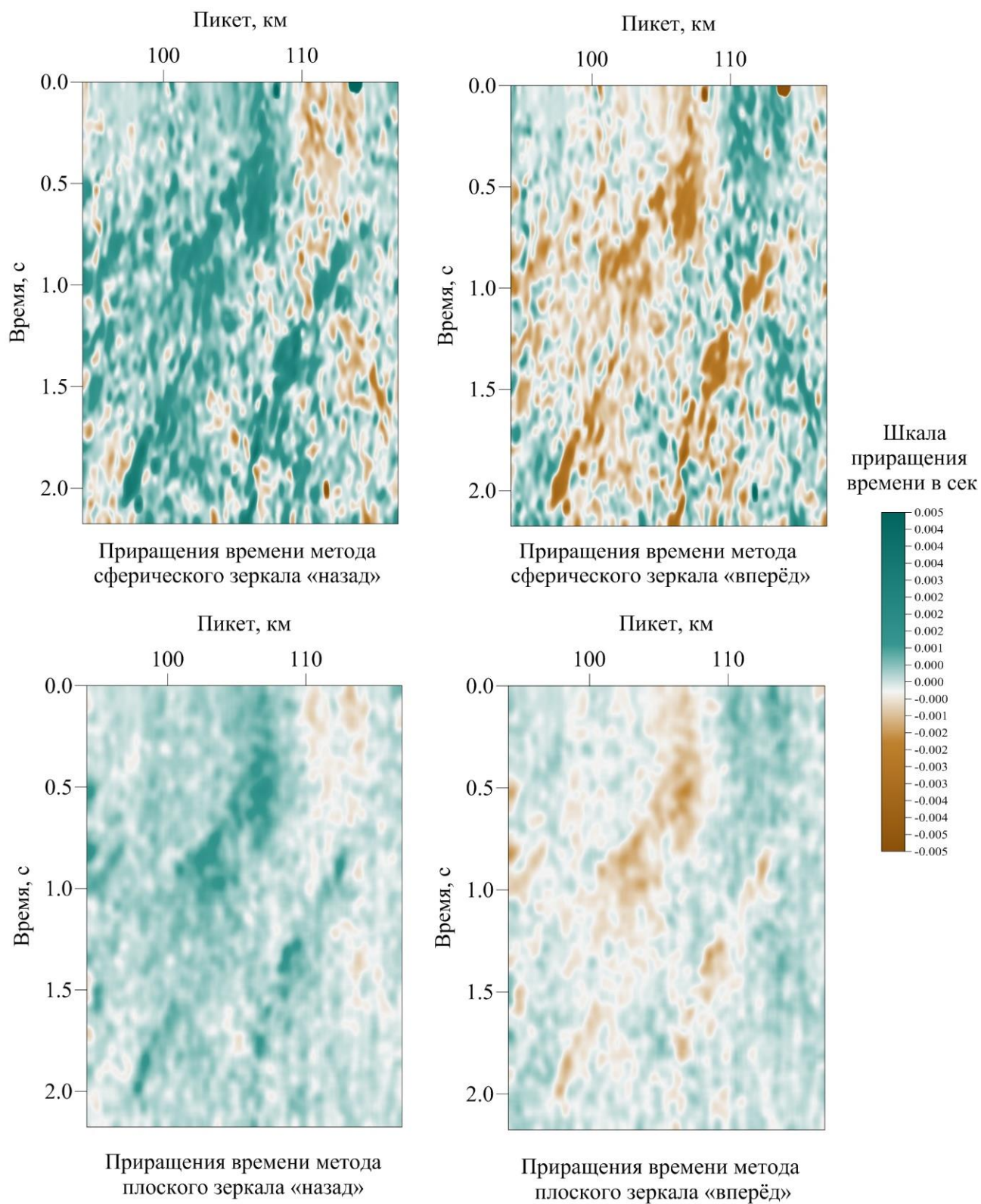


Рис. 2. Разрезы приращения времени

Эти варианты авторы считают четырьмя типами сейсмостратиграфических разрезов:

1. θ – время на заданном пикете в точке, через которую проходит кривая отражения. S. Fomel рассматривает такой вариант для срединного пикета на профиле [Fomel, 2010]. Тип данного разреза – разрез времени отражения на указанном пикете;

2. θ – значение амплитуды трассы или динамического параметра трассы в заданном пикете в точке, через которую проходит кривая отражения. В работе S. Fomel расчёт такого типа сейсмостратиграфического разреза для амплитуд выполняется оператором «предсказывающего рисования» опорной трассы (predictive painting) [Fomel, 2010]. Тип данного разреза – разрез атрибута отражения на указанном пикете;

3. θ – среднее время кривой отражения:

$$\theta = \frac{\int_{x_b}^{x_e} \tau(x) dx}{x_e - x_b}, \quad (15),$$

где x_b и x_e координаты начала и конца профиля. Тип разреза – разрез среднего времени отражения;

4. θ – значение каротажной кривой, совмещённой с заданным пикетом разреза в точке, через которую проходит кривая отражения. Тип разреза – разрез каротажа с учётом кинематики отражений. Примеры расчёта сейсмостратиграфических разрезов двух последних типов (среднего времени и каротажа) приведены на рис. 3.

Другое приложение семейства кривых отражений: пусть через точку (x, τ_0) временного разреза $u(x, \tau)$ проходит кривая отражения $\tau(x)$ из семейства параметрических кривых, тогда, суммируя амплитуды вдоль этой кривой, можно рассчитать новый разрез:

$$u(x, \tau_0) = \int_{l=-\Delta x}^{l=\Delta x} u(x + l, \tau(x + l, \tau_0)) dl, \quad (16),$$

где Δx – окрестность суммирования. Авторы считают, что такой разрез рассчитан *методом «сейсмостратиграфического суммирования»*. Сейсмостратиграфическое суммирование по существу представляет собой расширение метода «Сферическое зеркало» на любые по протяжённости окрестности суммирования. Аналогичное суммирование можно выполнять и для сейсмограмм, где каждая отдельная сейсмограмма будет рассматриваться как разрез. Сейсмостратиграфическое суммирование сейсмограмм существенно расширяет методы мультифокусирования сейсмограмм (CRS, MF, KF). Примеры расчёта разрезов и сейсмограмм сейсмостратиграфического суммирования приведены на рис. 4.

Ещё одно приложение кривых отражений заключается в следующем: так как через каждую точку (x, τ) проходит кривая отражения $\tau(x)$ из семейства параметрических кривых, то вдоль этой кривой можно выполнять линейную интерполяцию в эту точку данных $p(X_i, \tau)$ с заданных пикетов профиля X_i справа и слева от неё:

$$p(x, \tau) = \frac{(x - X_i)p(X_{i+1}, \tau(X_{i+1})) + (X_{i+1} - x)p(X_i, \tau(X_i))}{X_{i+1} - X_i} \quad (17).$$

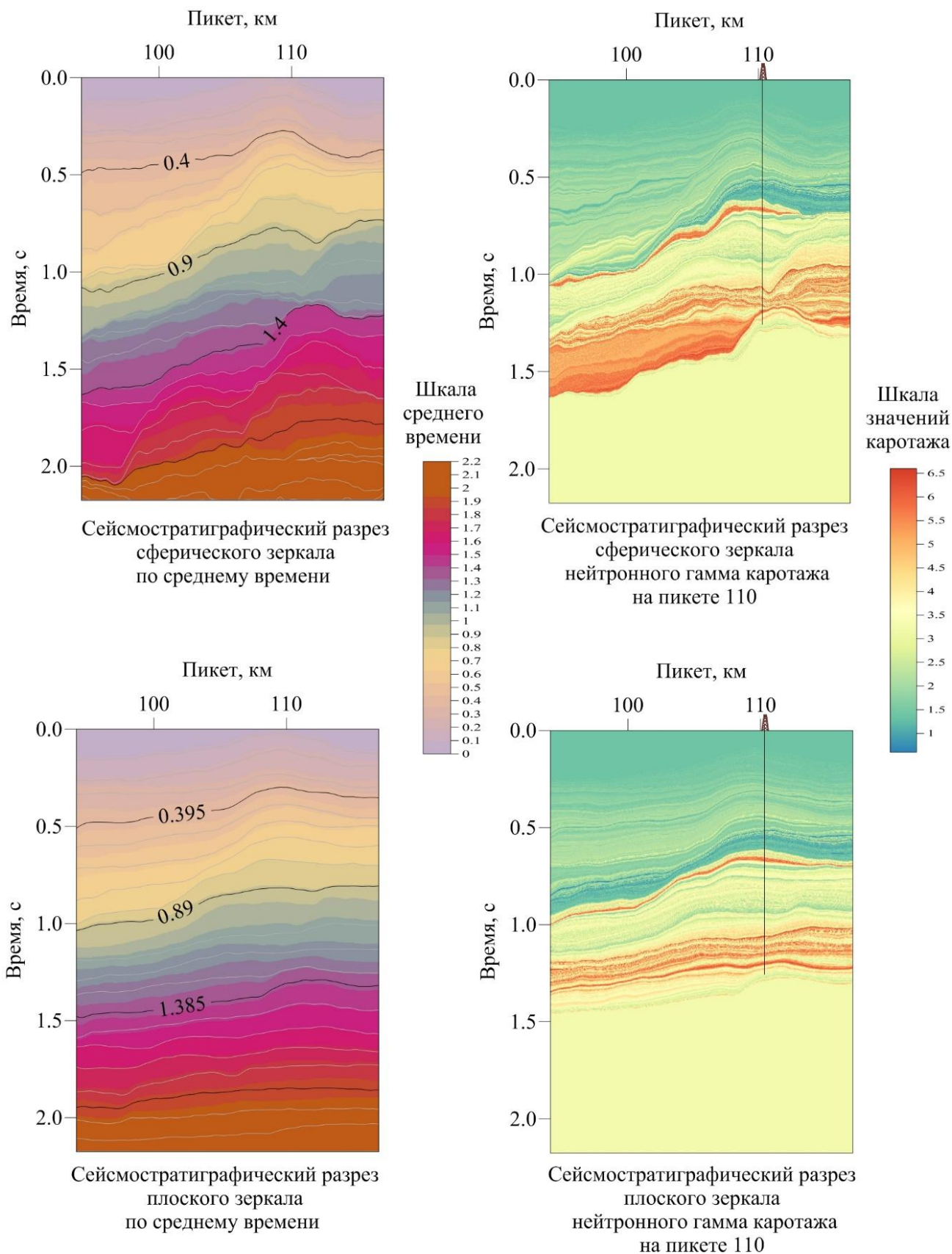


Рис. 3. Сеймостратиграфические разрезы

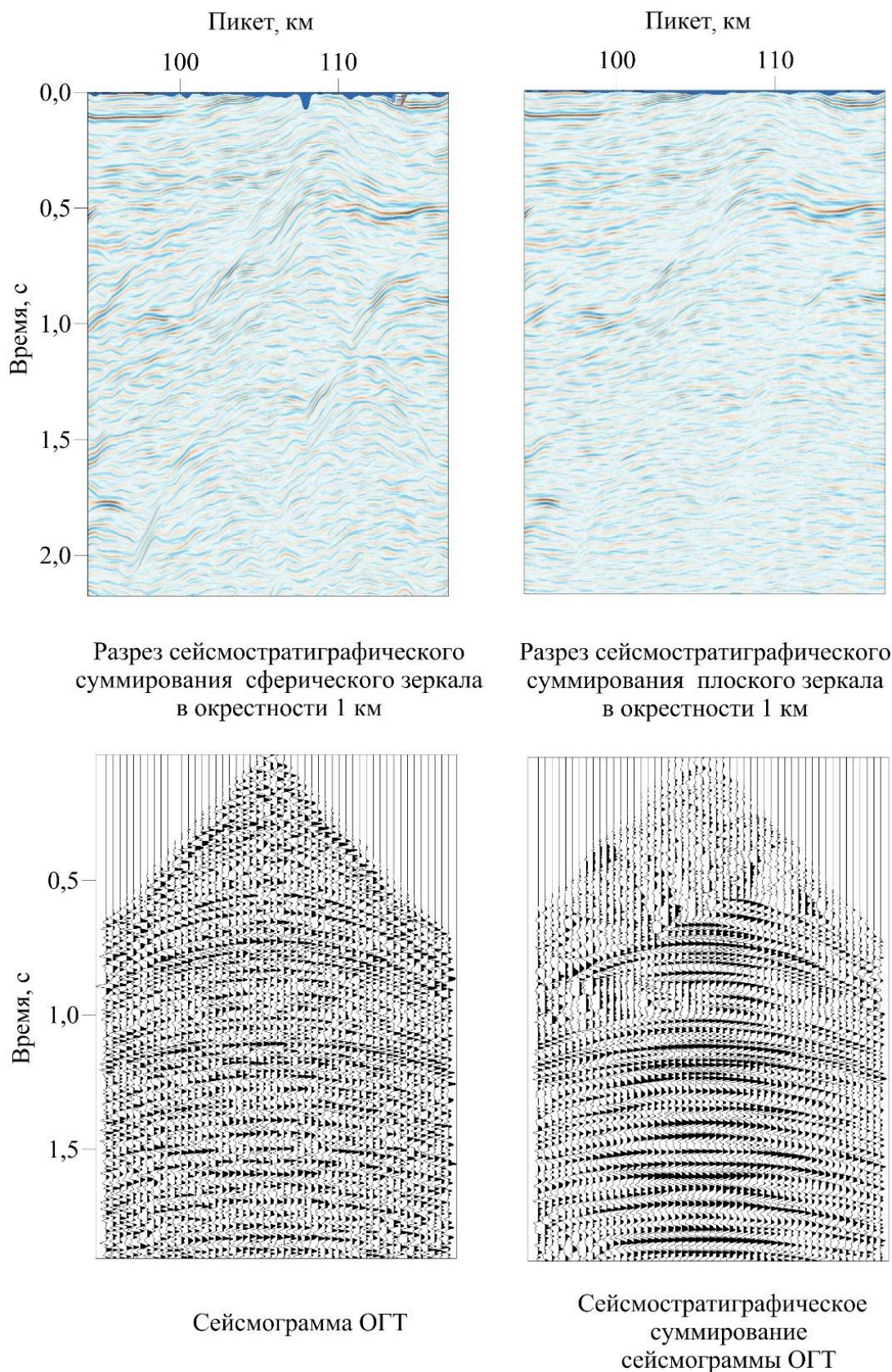


Рис. 4. Сейсмостратиграфическое суммирование

Здесь $X_i < x < X_{i+1}$. Такую интерполяцию будем называть *сейсмостратиграфической интерполяцией*. В качестве интерполируемых данных $p(X_i, \tau)$ могут быть амплитуды разреза,

значения динамических параметров, значения каротажных кривых и пр. *Сейсмостратиграфическая интерполяция* предполагает учёт кинематики отражений. Примеры сейсмостратиграфической интерполяции приведены на рис. 5.

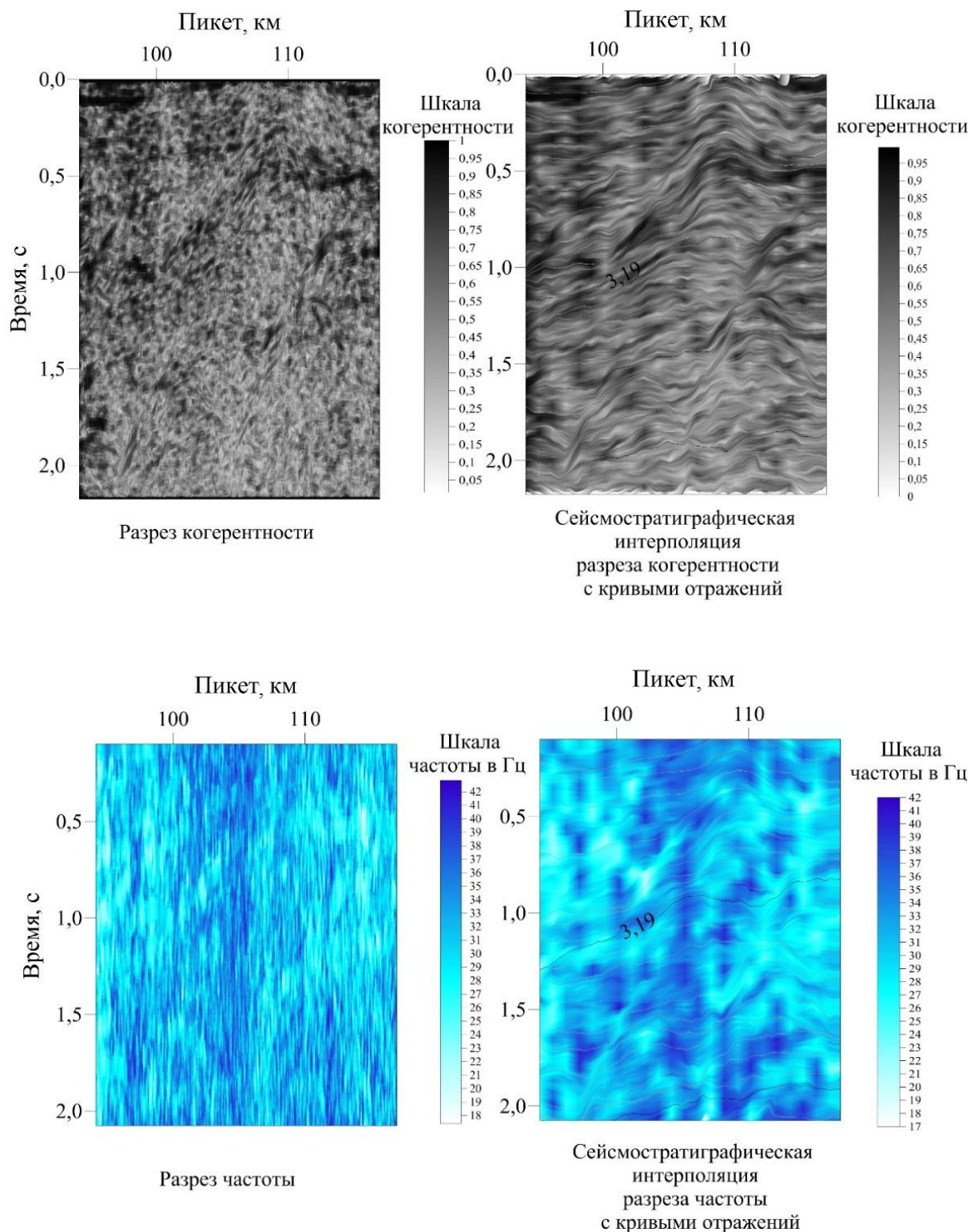


Рис. 5. Сейсмостратиграфическая интерполяция

Все представленные выше рисунки (см. рис. 1-5) получены в результате сейсмических исследований на профиле в районе Северной Тунгуски.

Апробация разработанных методик выполнялась и при проведении работ в Центральной экологической зоне Байкальской природной территории (2015-2017 гг.) ФГБУ «Всероссийским научно-исследовательским геологическим институтом им. А.П. Карпинского» в соответствии с федеральной целевой программой «Охрана озера Байкал и социально-экономическое развитие Байкальской природной территории на 2012 - 2020 годы». Результаты применения методик представлены на уникальных сейсмических материалах, полученных на акватории озера Байкал¹. На рис. 6 - исходный временной разрез по одному из профилей, проходящих через озеро Байкала, после стандартной обработки 1992 г.²

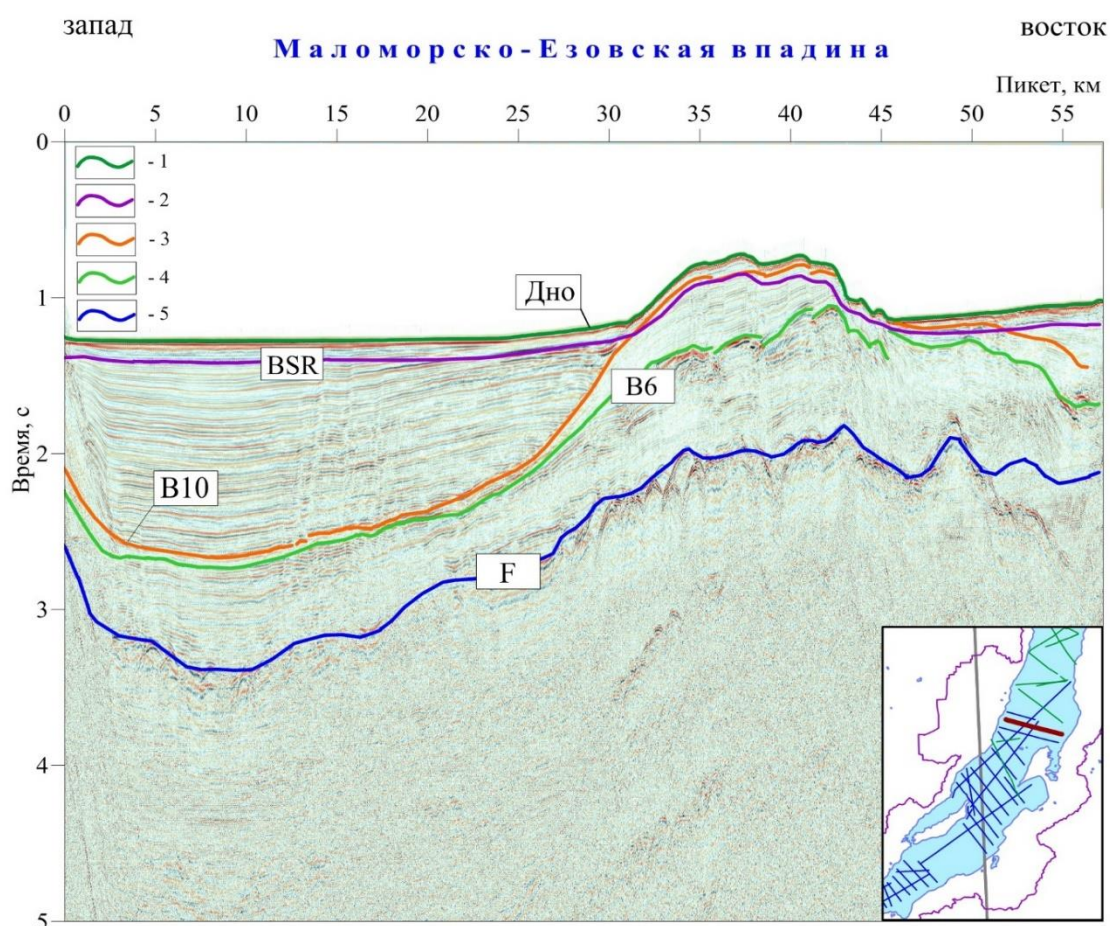


Рис. 6. Временной разрез по одному из профилей оз. Байкал после стандартной обработки

1 - дно озера Байкал; 2 - подошва газогидратного слоя (BSR); 3 - граница несогласия, вызванная нюрганской тектонической фазой (B10); 4 - граница несогласия, соответствующая ольхонской тектонической фазе (B6); 5 - кровля дорифтового фундамента (F).

¹Морские многоканальные наблюдения были проведены в 1992 г. Геологической службой США, Лимнологическим институтом СО РАН, Институтом океанологии РАН [Гольмиток, 1995; Леви, 1995].

²Обработка выполнена Геологической службой США [Agena, 1992].

Этот разрез обработан методом сейсмостратиграфического суммирования в варианте «Сферического зеркала» в окрестности 1 км (рис. 7). На полученном разрезе отмечено проявление горизонтов на больших глубинах, чем на исходном разрезе.

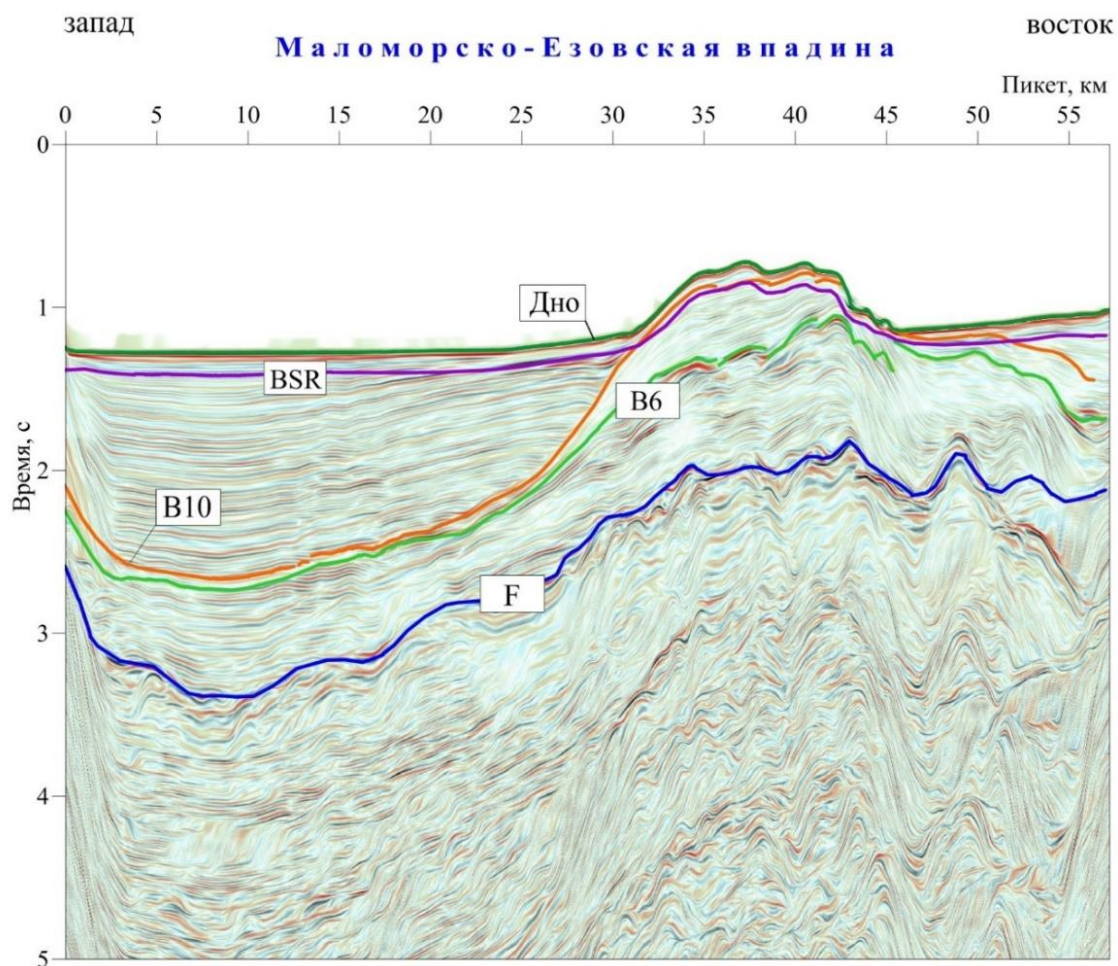


Рис. 7. Разрез сейсмостратиграфического суммирования

Условные обозначения см. на рис. 6.

На рис. 8 приведён сейсмостратиграфический разрез по тому же профилю. На разрезе изолинии сейсмостратиграфических слоёв почти идентичны результатам ручного прослеживания горизонтов. Отражающий горизонт, соответствующий границе фундамента F, выделяется по интенсивному отражению и неровному, расчлененному рельефу поверхности на разрезе сейсмостратиграфического суммирования (см. рис. 7) и по контрастному переходу от теплых тонов (бежевый, желтый) к более холодным цветам (голубой, серый) на сейсмостратиграфическом разрезе (см. рис. 8). Внутри толщи осадочного чехла, сложенного мезозойско-кайнозойскими отложениями, отражающие горизонты B6 и B10 соответствуют изолиниям сейсмостратиграфического разреза. На рис. 8 кривые времён отражения ниже кровли фундамента предположительно свидетельствуют о сложности геологического строения кристаллических пород Байкальской рифтовой зоны.

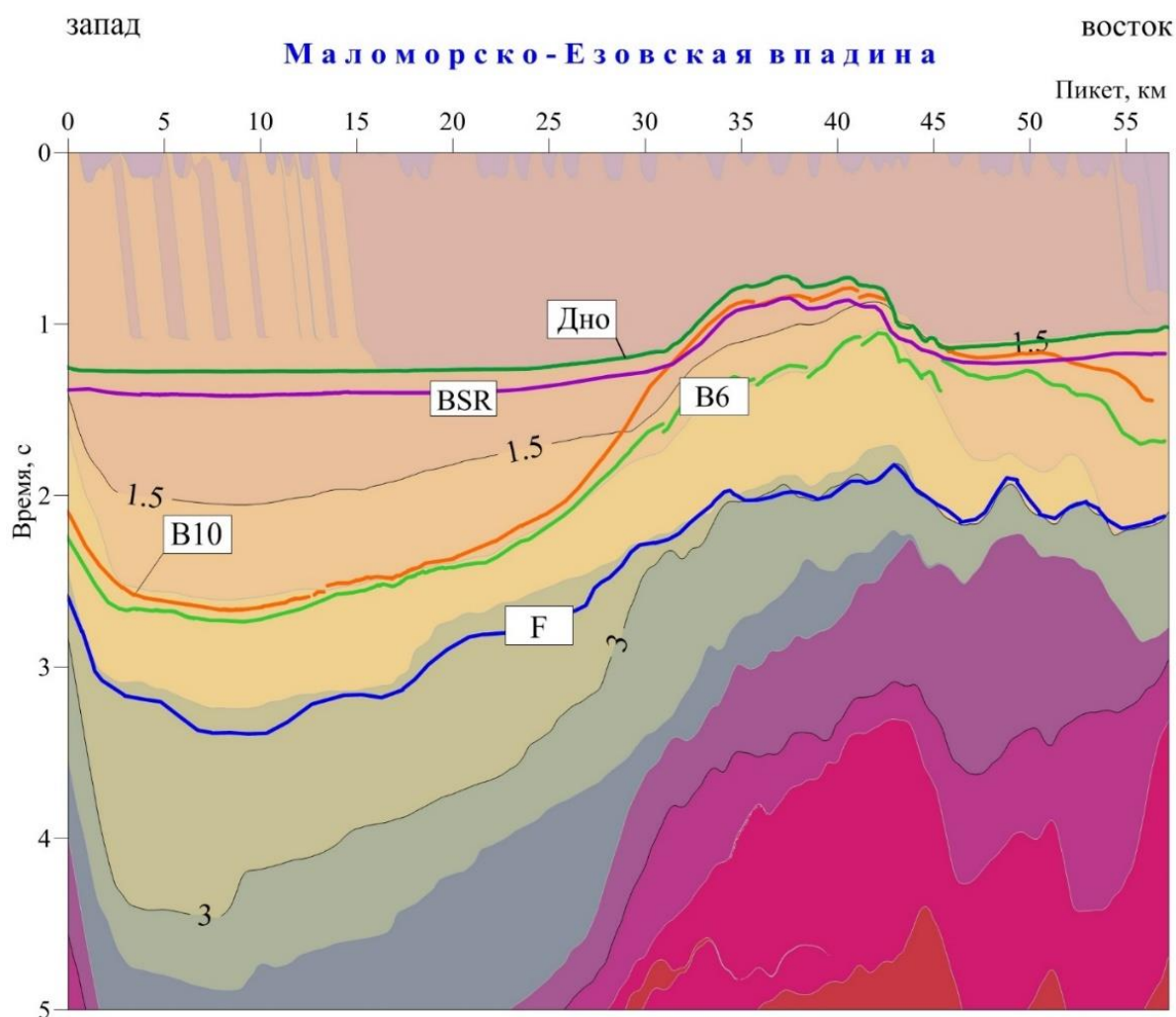


Рис. 8. Сейсмостратиграфический разрез

Условные обозначения см. на рис. 6.

Авторы признательны зав. лаб. ИНГГ СО РАН, к. г.-м. н. В.В. Лапковскому, который рассказал о предложенном им понятии «непрерывная сейсмостратиграфическая модель» и его методах, используемых для построения данных моделей. Существенная помощь оказана профессором Техасского университета (Остин, США), PhD, С. Фомелем (S. Fomel) его комментариями и замечаниями при обсуждении данной темы.

Литература

Вистелиус А.Б., Романова М.А. Красноцветные отложения полуострова Челекен (литостратиграфия и геологическое строение). - М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1962. - 227 с.

Гольмшток А.Я. От черного моря до Байкала: О сейсмических исследованиях Л.П. Зоненшайта на озере Байкал // Лев Павлович Зоненшайт: Очерки. Воспоминания / РАН; Отв. Ред.: Хаин В.Е., Московский А.А.; Сост. Филиппова И.Б. - М.: Наука, 1995. - С. 172-174, 180-181.

Гриценко С.А. Изображение геологических разрезов и определение скоростей методом общей глубинной точки. - СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2014. - 119 с.

Губерман Ш.А., Овчинникова М.И. О машинной корреляции пластов в разрезе скважин по геофизическим данным // Изв. АН СССР. Физика Земли. - 1972. - № 3. - С. 87–94.

Кузьмин М.И., Карабанов Е.Б., Каваи Т., Вильямс Д., Бычинский В.А., Кербер Е.В., Кравчинский В.А., Безрукова Е.В., Прокопенко А.А., Гелетий В.Ф., Калмычков Г.В., Горегляд А.В., Антипин В.С., Хомутова М.Ю., Сошина Н.М., Иванов Е.В., Хурсевич Г.К., Ткаченко Л.Л., Э.П. Солотчина Э.П., Йошида Н., Гвоздков А.Н. Глубоководное бурение на Байкале – основные результаты // Геология и геофизика. – 2001. - № 1-2. - С. 8-34.

Лапковский В.В. Непрерывная сейсмостратиграфическая модель как основа структурной интерпретации разрезов методом общей глубинной точки // Технологии сейсморазведки. – 2012. - № 4. - С. 33–39.

Левин К.Г., Бабушкин С.М., Бадардинов А.А., Буддо В.Ю., Ларкин Г.В., Мирошниченко А.И., Саньков В.А., Ружич В.В., Вонг Х.К., Дельво Д., Колман С. Активная тектоника Байкала // Геология и геофизика. - 1995. - Т. 36. - № 10. - С. 154-163.

Agona W.F., Lee M.W., Miller J.J., Hutchinson R.D., 1992. Lake Baikal – 1992 Processing of Multichannel Seismic Reflection Data U.S. Geological Survey Open-File Report 94-263, 1992. - P.45.

Claerbout J.F. Earth soundings analysis: Processing versus inversion: Black-well Scientific Publications. 1992. - P. 304.

Fomel S. Shaping regularization in geophysical-estimation problems: Geophysics, 2007, 72, R29-R36. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.2433716>

Fomel S. Predictive painting of 3-D seismic volumes, Geophysics, 2010, 75, no. 4. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.3453847>

Gelchinsky B., Berkovitch A., and Keydar S. Multifocusing Homeomorphic Imaging, Part 1: Basic concepts and formulae: Journal of Applied Geophysics, 1999, v. 42/3-4, p. 229-242. Part 2. Multifold data set and Multifocusing: Journal of Applied Geophysics, 42, p. 243–260.

Jäger R., Mann J., Hocht G., and Hubral P. Common-reflection-surface stack: Image and attributes: Geophysics, 2001, 66, p. 97–109. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1444927>

Stark T.J. Unwrapping instantaneous phase to generate a relative geologic time volume. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2003: pp. 1707-1710. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1844072>

Taner M.T., Koehler F. Velocity spectra-digital computer derivation and applications of velocity function. Geophysics, 1969, v. 34, p. 859-81. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1440058>

Gritsenko S.A.

A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI), St. Petersburg, Russia,
Gritsenko1@yandex.ru

Egorova N.V.

St Petersburg University, St. Petersburg, Russia, Egorovanataliia@gmail.com

**SEISMOSTRATIGRAPHY, MULTIFOCUSING AND INTERPOLATION
OF SEISMIC SECTIONS: MATHEMATICAL REVIEW**

The paper can be considered as a mathematical overview of the algorithms of a new representation of seismogeological sections. The article presents methods of seismostratigraphic sections construction and new ways for multifocusing of sections and methods for interpolating of seismic and well data based on them.

It is assumed that the algorithms discussed here could be able to change the activity to automatic data processing because most of the manual labor in picking levels. Presenting seismic data in a form as convenient as possible to understanding the geological structure will be more efficiently.

Keywords: *processing and interpretation of seismic data, multifocusing, seismostratigraphic section, well data, interpolation of time sections.*

References

Agena W.F., Lee M.W., Miller J.J., Hutchinson R.D. Lake Baikal – 1992 Processing of Multichannel Seismic Reflection Data U.S. Geological Survey Open-File Report 94-263, 1992, p.45.

Claerbout J.F. Earth soundings analysis: Processing versus inversion: Black-well Scientific Publications. 1992, p. 304.

Fomel S. Shaping regularization in geophysical-estimation problems: Geophysics, 2007, 72, pp. 29-36. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.2433716>

Fomel S. Predictive painting of 3-D seismic volumes, Geophysics, 2010, 75, no. 4. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.3453847>

Gelchinsky B., Berkovitch A., and Keydar S. Multifocusing Homeomorphic Imaging, Part 1: Basic concepts and formulae: Journal of Applied Geophysics, 1999, vol. 42/3-4, pp. 229-242. Part 2. Multifold data set and Multifocusing: Journal of Applied Geophysics, 42, pp. 243–260.

Gol'mshtok A.Ya. *Ot chernogo morya do Baykala: O seysmicheskikh issledovaniyakh L.P. Zonenshayta na ozere Baykal* [From the Black Sea to Lake Baikal: about L.P. Sonenshait seismic studies on Lake Baikal]. Lev Pavlovich Zonenshayt: Ocherki. Vospominaniya / Editors: V.E. Khain, A.A. Moskovskiy; Sost. I.B. Filippova. Moscow: Nauka, 1995, pp. 172-174, 180-181.

Gritsenko S.A. *Izobrazhenie geologicheskikh razrezov i opredelenie skorostey metodom obshchey glubinnoy tochki* [The image of geological sections and the determination of velocities by the common depth point method]. St. Petersburg: Izd-vo VSEGEI, 2014, 119 p.

Guberman Sh.A., Ovchinnikova M.I. *O mashinnoy korrelyatsii plastov v razreze skvazhin po geofizicheskim dannym* [Geophysical automatic data processing correlation in the wells section]. Izv. AN SSSR. Fizika Zemli, 1972, no. 3, pp. 87–94.

Jäger R., Mann J., Hocht G., and Hubral P. Common-reflection-surface stack: Image and attributes: Geophysics, 2001, 66, p. 97–109. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1444927>

Kuz'min M.I., Karabanov E.B., Kawai T., Vil'yams D., Bychinskiy V.A., Kerber E.V., Kravchinskiy V.A., Bezrukova E.V., Prokopenko A.A., Geletiy V.F., Kalmychkov G.V., Goreglyad A.V., Antipin V.S., Khomutova M.Yu., Soshina N.M., Ivanov E.V., Khursevich G.K., Tkachenko L.L., E.P. Solotchina E.P., Yoshida N., Gvozdkov A.N. *Glubokovodnoe burenie na Baykale – osnovnye rezul'taty* [Baikal Lake deep-water drilling main results]. Geologiya i geofizika, 2001, no.1-2, pp. 8-34.

Lapkovskiy V.V. *Nepreryvnaya seysmostratigraficheskaya model' kak osnova strukturnoy interpretatsii razrezov metodom obshchey glubinnoy tochki* [Continuous seismostratigraphic model

as a basis for structural interpretation of sections by the common depth point method]. Tekhnologii seysmorazvedki, 2012, no. 4, pp. 33–39.

Levi K.G., Babushkin S.M., Badardinov A.A., Buddo V.Yu., Larkin G.V., Miroshnichenko A.I., San'kov V.A., Ruzhich V.V., Vong X.K., Del'vo D., Kolman S. *Aktivnaya tektonika Baykala* [Baikal Lake - active tectonics]. Geologiya i geofizika, 1995, vol. 36, no. 10, pp. 154-163.

Stark T.J. Unwrapping instantaneous phase to generate a relative geologic time volume. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2003: pp. 1707-1710. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1844072>

Taner M.T., Koehler F. Velocity spectra-digital computer derivation and applications of velocity function. Geophysics, 1969, v. 34, p. 859-81. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1440058>

Vistelius A.B., Romanova M.A. *Krasnotsvetnye otlozheniya poluostrova Cheleken (litostratigrafiya i geologicheskoe stroenie)* [Reddish deposits of Cheleken Peninsula (lithostratigraphy and geological structure)]. Moscow; Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1962, 227 p.

© Гриценко С.А., Егорова Н.В., 2018