

Сеймостратиграфические разрезы в методе сферического зеркала

Аннотация

В статье рассматривается новый метод построения сеймостратиграфических моделей. Предлагается расширение понятия сеймостратиграфического разреза на разрезы физических параметров, знакомых из практики сейморазведки. Статья может представлять интерес для специалистов, занимающихся геологической интерпретацией данных сейморазведки, в частности новыми подходами к традиционным способам слежения отражений и обобщения результатов слежения сейсмических горизонтов на представление о геологическом разрезе. Предполагается, что рассмотренные здесь алгоритмы смогут автоматизировать большую часть ручного труда интерпретации сейсмических данных и представить результаты интерпретации в форме более адекватной для геологического восприятия.

Введение

В статье (Лапковский, 2012) введено понятие «сеймостратиграфическая модель». Как и любой сейсмический разрез, рассматриваемый в этой статье «сеймостратиграфический разрез» является двумерной функцией расстояния по профилю и времени либо глубины. Но в отличие от обычного разреза где изолиниями этой функции являются физические параметры (амплитуды интенсивности, частоты, затухания и пр.),

¹ Федеральное государственное унитарное предприятие «ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени А.П. КАРПИНСКОГО», Лаборатория методических разработок интерпретации сейсмических данных, 199106, Санкт-Петербург, Средний пр., 74, E-mail: gritsenko1@yandex.ru

изолиниями сейсмостратиграфического разреза являются линии времён отражающих поверхностей. Причём, как и любые изолинии эти линии определены для любого времени или глубины. В указанной работе построение сейсмостратиграфического разреза основано на автоматическом слежении отражений, причём такое слежение должно быть определено для любого времени. Для этой цели использованы методы применяемые при корреляции данных ГИС (планшет Жековского (Гришкевич, 1974) и методы определения оптимальной траектории на этом планшете. Решение таких задач оптимизации реализовано с помощью алгоритмов муравьиной колонии (Dorigo, 1992) и волнового алгоритма Ли (Lee, 1961).

В предлагаемой статье рассматривается другой подход для построения сейсмостратиграфического разреза. В ней, для этой цели, использован метод «Сферического зеркала» (Гриценко, 2012), а также расширено понятие сейсмостратиграфического разреза на обычные разрезы физических параметров, но с использованием «сейсмостратиграфической модели».

Теория и практика

Пусть задано параметрическое семейство непересекающихся плоских кривых $\tau(x, \theta)$ в плоскости (x, τ) . Здесь параметр θ идентифицирует кривую $\tau(x)$ в параметрическом семействе кривых. Такое параметрическое семейство кривых инициирует двумерную функцию $\theta(x, \tau)$, изолиниями которой являются кривые этого семейства. Действительно, если в качестве изолиний двумерной функции зависящей от x и τ выбрать кривые параметрического семейства, то значениями изолинии этой функции будут значения параметра θ так как он постоянен для фиксированной кривой как для изолинии. Верно и обратное: двумерная функция $\theta(x, \tau)$ определяет параметрическое семейство непересекающихся кривых $\tau(x, \theta)$ как совокупность изолиний этой функции, где параметром θ семейства кривых является значения изолиний.

В этой работе рассматривается параметрическое семейство кривых $\tau(x, \theta)$ являющихся на временном разрезе временами отражений от семейства сейсмических границ. Будем считать, что сейсмическая граница определена на любой глубине и значит кривая времени отражения определена в любой точке временного разреза. Поскольку так определённое семейство параметрических кривых $\tau(x, \theta)$ времени отражений связано с совокупностью границ геологического разреза, то будем называть двумерную функцию $\theta(x, \tau)$, инициируемую этим семейством, *сейсмостратиграфическим разрезом*.

Для того чтобы каждая кривая $\tau(x)$ параметрического семейства кривых $\tau(x, \theta)$ была временем отражения от сейсмической границы нужно чтобы в её окрестности по x и τ оператор когерентности *Semblance* (Taner, Koehler, 1969) был максимален на разрезе $u(x, \tau)$:

$$\max_{\tau(x)} \frac{\int_{t=t_0-\Delta_t}^{t_0+\Delta_t} \left(\int_{x=x_0-\Delta_x}^{x_0+\Delta_x} u(x, \tau(x)+t) dx \right)^2 dt}{\int_{t=t_0-\Delta_t}^{t_0+\Delta_t} \int_{x=x_0-\Delta_x}^{x_0+\Delta_x} u^2(x, \tau(x)+t) dx dt} \quad (1)$$

Здесь (x_0, t_0) - точка на временном разрезе, через которую проходит искомая кривая: $t_0 = \tau(x_0)$. Δ_x, Δ_t – параметры определяющие окрестность кривой.

Так как в (1) интервал Δ_x поиска максимума ограничен то, с приемлемой точностью, можно представить кривую $\tau(x)$ в любой точке (x_0, t_0) временного разреза полиномом второго порядка:

$$\tau(x) = t_0 + A(x_0, t_0) * x + B(x_0, t_0) * x^2 \quad (2)$$

Подстановкой (2) в (1) задача нахождения кривых времени отражений сводится к расчёту разрезков коэффициентов A и B полинома из (2):

$$\max_{A(x_0, t_0), B(x_0, t_0)} \frac{\int_{t=t_0-\Delta t}^{t_0+\Delta t} \left(\int_{x=x_0-\Delta x}^{x_0+\Delta x} u(x, t_0 + A(x_0, t_0) * x + B(x_0, t_0) * x^2 + t) dx \right)^2 dt}{\int_{t=t_0-\Delta t}^{t_0+\Delta t} \int_{x=x_0-\Delta x}^{x_0+\Delta x} u^2(x, t_0 + A(x_0, t_0) * x + B(x_0, t_0) * x^2 + t) dx dt} \quad (3)$$

Найдя разрезы коэффициентов путём решения экстремальной задачи (3) можно в любой точки разреза вычислить кривые времён отражений в соответствии с (2). Суммируя вдоль этих кривых амплитуды разреза найдём новый разрез $U(x_0, t_0)$:

$$U(x_0, t_0) = \int_{x=x_0-\Delta x}^{x_0+\Delta x} u(x, t_0 + A(x_0, t_0) * x + B(x_0, t_0) * x^2) dx \quad (4)$$

Экстремальная задача (3) с последующим расчётом нового разреза (4) и составляют сущность метода «сферического зеркала» обработки сейсмических разрезов (Гриценко, 2012). Этот метод является аналогом методов «Мультифокусинг» (Gelchinsky et al., 1999) и «CRS» (Jäger et al., 2001) используемых для обработки сейсмограмм.

Посмотрим как работает метод сферического зеркала. На рис. 1 представлен исходный разрез полученный в районах Северной Тунгуски. На рис. 2 разрезы коэффициентов A и B разложения (3) найденные после решения задачи (4). Рис 3. иллюстрирует результат обработки по методу сферического зеркала в соответствии с (3, 4).

Вернёмся к задаче построения сеймостратиграфического разреза. Рассчитываемые в методе сферического зеркала коэффициенты A и B параболического разложения (2) времён отражений в каждой точке разреза позволяют построить совокупность кривых времён отражений $\tau(x)$ следующим образом. Если известно значение времени τ кривой отражения $\tau(x)$ на некоторой трассе x , то можно согласно (2) вычислить время $\tau(x + \Delta)$ на соседней трассе $x + \Delta$ отстоящей от первоначальной на расстоянии Δ :

$$\tau(x + \Delta) = \tau(x) + A(x, \tau(x))\Delta + B(x, \tau(x))\Delta^2 \quad (5)$$

Итеративная формула (5) позволяет рассчитать кривую времени отражения, начиная с любой точки временного разреза. Но для построения сейсмостратифицированного разреза необходимо определить *параметрическое* семейство кривых времён отражений. Для этого в качестве параметра θ временной кривой можно выбрать её значение(время) на заданной трассе X . В работе (Лапковский, 2012) предлагается в качестве такого параметра использовать значение произвольной функции от этого времени, но здесь введение такой функции представляется излишним.

Как уже отмечалось выше параметрическое семейство кривых порождает двумерную функцию названную сейсмостратиграфическим разрезом. Изолиниями этой функции являются кривые из этого семейства, а значениями функции на изолиниях - значения параметра идентифицирующего кривую. Если в качестве такого параметра выбирается значение кривой на заданной трассе, то такая функция определяется неоднозначно, так как на другой трассе параметр θ кривой определяется по другому. Что бы избавиться от неоднозначности в работе (Лапковский, 2012) предлагается строить совокупность сейсмостратиграфических разрезов каждая из которых относится к параметризации кривых на случайно выбранной трассе, а затем осреднением этих разрезов, определить единственный сейсмостратиграфический разрез данного профиля. Развивая это предложение не на случайно выбранные трассы, а на каждую трассу приходим к тому что в качестве параметра θ кривой выбирается не её значение на трассе, а среднее значение времени для всей кривой:

$$\theta = \frac{\int_{x_b}^{x_e} \tau(x) dx}{x_e - x_b} \quad (6)$$

Здесь x_b и x_e координаты начала и конца профиля.

Пример расчёта сейсмостратиграфического разреза порождаемый параметризацией по среднему времени (6) по Северной Тунгуске (рис. 1) приведён на рис. 4. Этот разрез согласуется с структурными особенностями разреза после обработки методом сферического зеркала (см. их сравнение на рис. 5.).

Интерактивная формула (5) позволяет рассчитывать временные кривые для в любой точке разреза и такие кривые нигде не обрываются. Мы можем суммировать вдоль них амплитуды разреза и относить такие суммы к любой точки разреза. Построенный таким способом разрез будем называть разрез сейсмостратиграфического суммирования. Такой способ суммирования по существу представляет собой расширение метода сферического зеркала на любые по протяжённости базы суммирования. Пример разреза сейсмостратиграфического суммирования приведён на рис. 7

Кроме суммирования временные кривые (5) можно использовать для интерполяции любых физических параметров (например, каротажных кривых) определённых в некоторых пикетах в любую точку разреза. Такие разрезы будем называть разрезами сейсмостратиграфической интерполяции. Остановимся на этом подробнее.

Как уже отмечено во введении, изолиниями сейсмостратиграфического разреза являются времена отражений. А для обычных разрезов изолиниями являются значения физических параметров. Но физические параметры отражений меняются вдоль изолиний времени отражений. Можно ли учесть это изменение на сейсмостратиграфическом разрезе? Здесь предлагается способ такого учёта и построение новых сейсмостратиграфических разрезов физических параметров. Пусть в заданной сети N пикетов профиля: $X_1, X_2, \dots, X_N$ заданы трассы $p(X_i, t)$ какого либо физического параметра (амплитуды интенсивности, частоты, затухания, каротаж и пр.). Здесь t – время или глубина. Требуется вычислить значения этого параметра в любой точке разреза (x, τ) с учётом изолиний сейсмостратифицированного разреза.

По определению такого разреза его изолиниями являются семейство кривых времени отражений $\tau(x)$. С помощью итеративного соотношения (6) можно рассчитать кривую $\tau(x)$ из этого семейства проходящую через заданную точку разреза (x, τ) и определить на трассах физического параметра справа X_{i+1} и слева X_i от этой точки её значение (времени или глубины): $\tau(X_{i+1})$, $\tau(X_i)$. Теперь по значениям физического параметра на этих временах (глубинах) можно путём линейной интерполяции вычислить значения физического параметра в любой точке разреза (x, τ) а значит рассчитать новый разрез $p(x, \tau)$:

$$p(x, \tau) = \frac{(x - X_i)p(X_{i+1}, \tau(X_{i+1})) + (X_{i+1} - x)p(X_i, \tau(X_i))}{X_{i+1} - X_i} \quad (7)$$

Рассчитанный по формулам (6) и (7) разрез будем называть сеймостратиграфическим разрезом *физического параметра* или *разрезом сеймостратиграфической интерполяции*. На рисунке 5 приведён сеймостратиграфический разрез *амплитуд*. Для его расчёта исходные трассы амплитуд в пикетах $X_1, X_2, \dots, X_N$ выбраны с разреза сферического зеркала (рис. 3) с равномерным шагом 5 км. Заметим, что эти трассы получены осреднением в методе сферического зеркала трасс исходного разреза (рис. 1) в окрестности 1 км. Сеймостратиграфический разрез амплитуд приведённый на рис. 6 отражает структуру сеймостратиграфического разреза (рис.4), а также дополнен существенными деталями поведения горизонтов между изолиниями последнего. На рис. 8 приведён сеймостратиграфический разрез когерентности. Для расчёта этого разреза исходные трассы выбраны в тех же пикетах что и для предыдущего разреза только с разреза когерентности рассчитываемого в методе сферического зеркала как значения максимального *Semblance* в (4). Сеймостратиграфический разрез когерентности также отражает структуру сеймостратиграфического разреза (рис.4) и между

изолиниями этого разреза характеризует отражательные свойства сейсмической среды связанные с типом пород геологического разреза.

Сейсмостратиграфические разрезы физических параметров рассчитываемые по рассмотренной методике можно строить не только для сейсмических параметров, но и для параметров ГИС. В этом случае разрезы будут представлять из себя разрезы каротажных кривых построенных с учётом кинематики отражений на сейсмическом разрезе. Их можно рассматривать как схемы корреляции каротажных данных согласованные с сейсмической информацией на профиле корреляции. Пример такого сейсмостратиграфического разреза нейтронного гамма каротажа представлен на рис 9.

Комментарии

Сравнивая предложенный здесь способ построения сейсмологических моделей с алгоритмами, рассмотренными в работе (Лапковский, 2012) отметим следующие: Временные функции в работе Лапковского ищутся на основании задачи оптимизации на планшете Жековского (Гришкевич, 1974). Планшеты Жековского состояются по каждой паре близлежащих трасс. Это означает что этот подход использует линейные представления о изменении времён в малой окрестности профиля, в то время как методе сферического зеркала временные функции ищутся на основе квадратичного изменения (3).

Использование всего лишь пары трасс для расчёта изменений времён может вызвать чувствительность такого алгоритма к помехам. В методе

сферического зеркала, напротив, квадратичное изменение ищется с использованием большого количества трасс в локальной окрестности точки отражения. В частности, здесь использовалась окрестность в 1 км, которая включает, при шаге между трассами 25 м, 40 трасс.

Наименование метода сферическое зеркало связано с тем, что в первоначальном варианте представление времён с точностью до второго порядка выполнялось с помощью отражений от сферической отражающей границы, что приводит к гиперболической зависимости время-расстояние вдоль профиля. В рассматриваемой работе для этой цели выбрана параболическая зависимость (3). Как показали численные расчёты, разрезы после обработки по этому методу см. рис. 3, практически не отличаются друг от друга при использовании этих разных аппроксимаций. А вот для построения сейсмостратиграфических разрезов (рис. 4-8) параболическая аппроксимация оказалась более приемлемой при больших наклонах отражающих границ.

Благодарности

Я признателен зав. лаб. ИНГГ им. А.А. Трофимука СО РАН, канд. геол.-мин. наук В.В. Лапковскому. Он рассказал мне о предложенном им понятии «сейсмостратиграфическая модель» и методах используемым для её построения. Я благодарен младшему научному сотруднику лаборатории математических проблем геофизики Санкт-Петербургского отделения Математического института им. В.А. Стеклова РАН М.Н. Демченко за помощь в программно-алгоритмической реализации метода сферического зеркала. Я также благодарен зам. ген. директора ВСЕГЕИ им. А.П. Карпинского, канд. геол.-мин. наук А.И. Ларичеву, за предоставленную возможность участия в гос.

контракте по Северной Тунгуске, в результате работы над которым получены все графические материалы этой статьи.

Литература

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

С.А. Гриценко, 2012, Изображение геологических разрезов и определение скоростей методом Общей глубинной точки, СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ (принято к печати).

Гришкевич В.Ф. Формальная постановка задачи детальной литолого-стратиграфической корреляции // НТС “Проблемы нефти и газа Тюмени”. 1974. № 23. С. 82–84.

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.

Лапковский В.В. Непрерывная сейсмостратиграфическая модель как основа структурной интерпретации разрезов МОГТ - Технологии сейсморазведки, № 4, 2012, с. 33–39

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

Dorigo M. Optimization, Learning and Natural Algorithm. Milano: Politecnico di Milano, 1992. 140 p.

Lee C.Y. An algorithm for path connections and its applications // IRE Transactions on Electronic Computers. 1961.V. 2. P. 346–365.

Jäger R., Mann J., Hocht G., and Hubral P., 2001, Common-reflection-surface stack: Image and attributes: Geophysics, 66, 97–109.

Taner M.T., Koehler F., 1969, Velocity spectra-digital computer derivation and applications of velocity function. Geophysics, v. 34, p. 859 – 81,

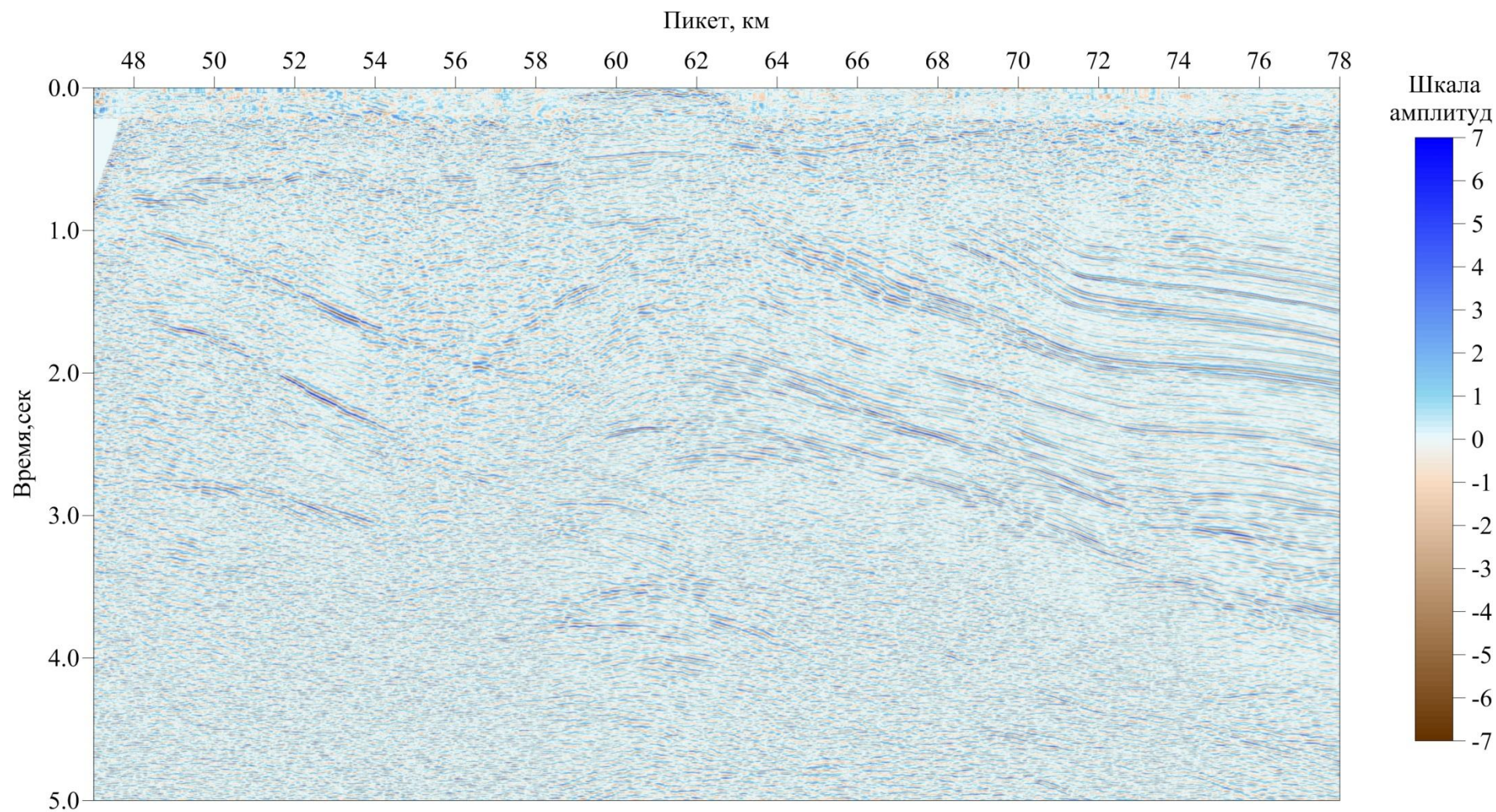


Рис.1 Исходный временной разрез по северной Тунгуске

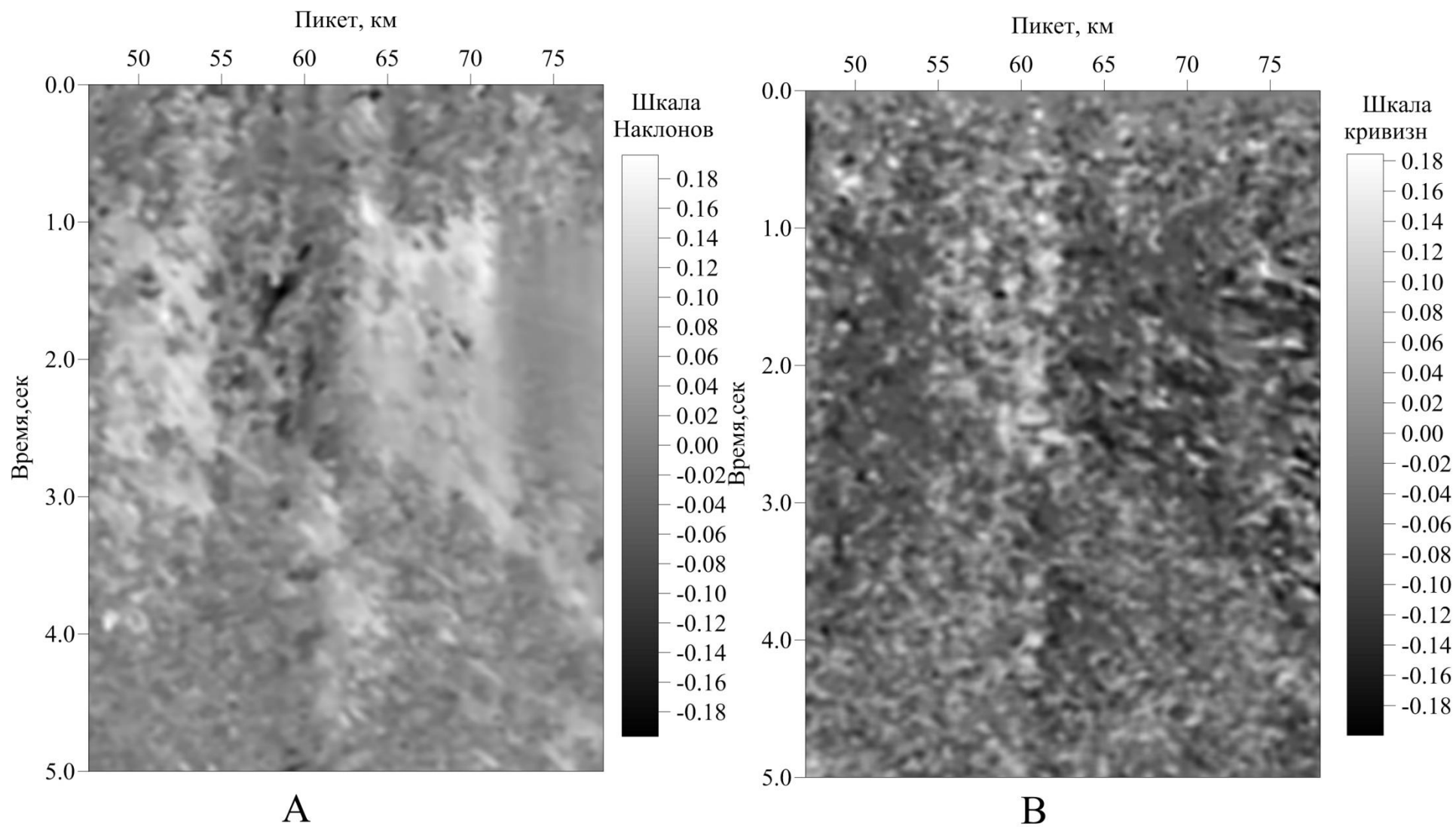


Рис. 2 Разрезы коэффициентов разложения (3): А-наклонов, В-кривизн

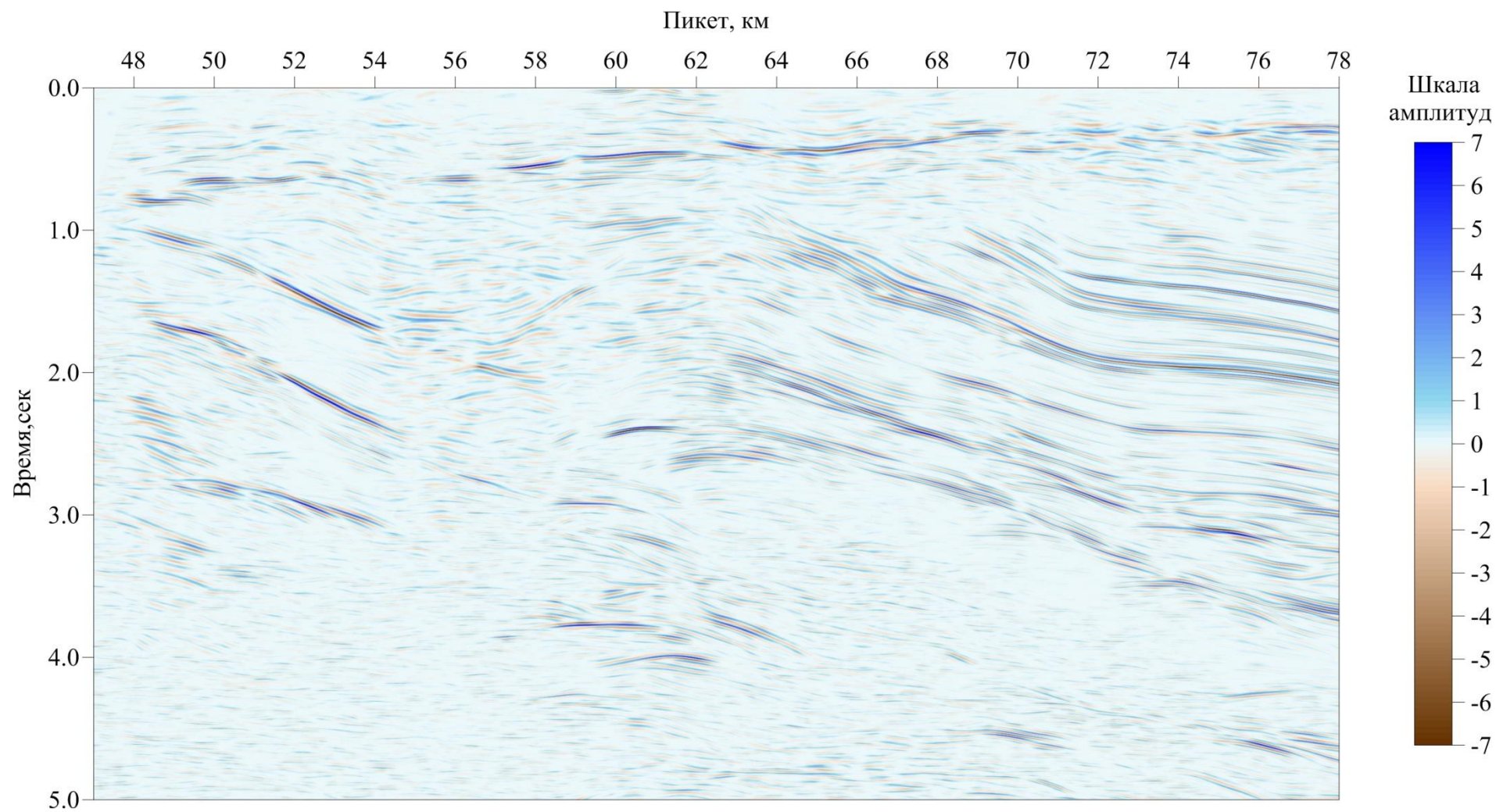


Рис. 3 Разрез после обработке по методу сферического зеркала

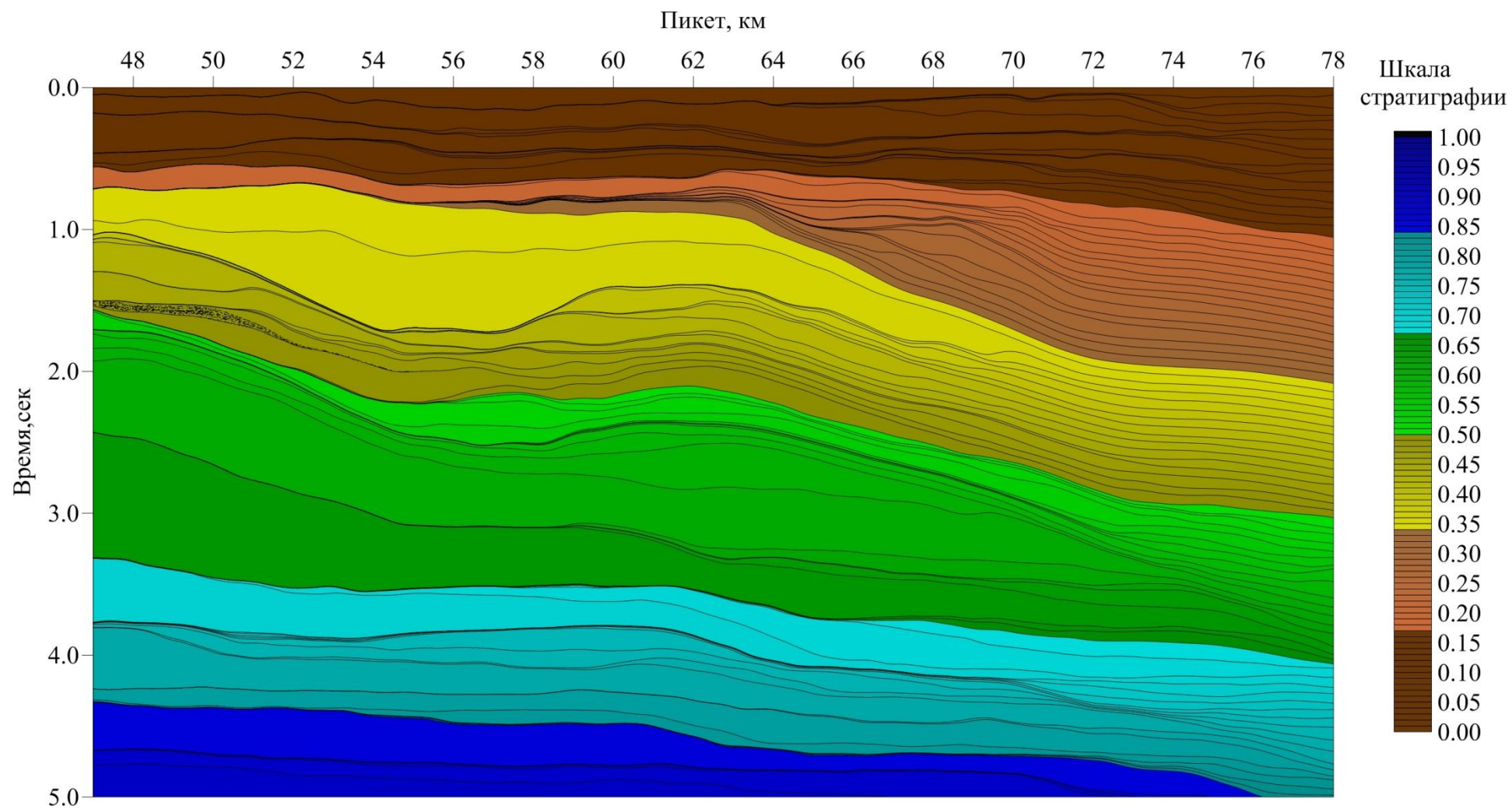


Рис. 4. Сеймостратиграфический разрез

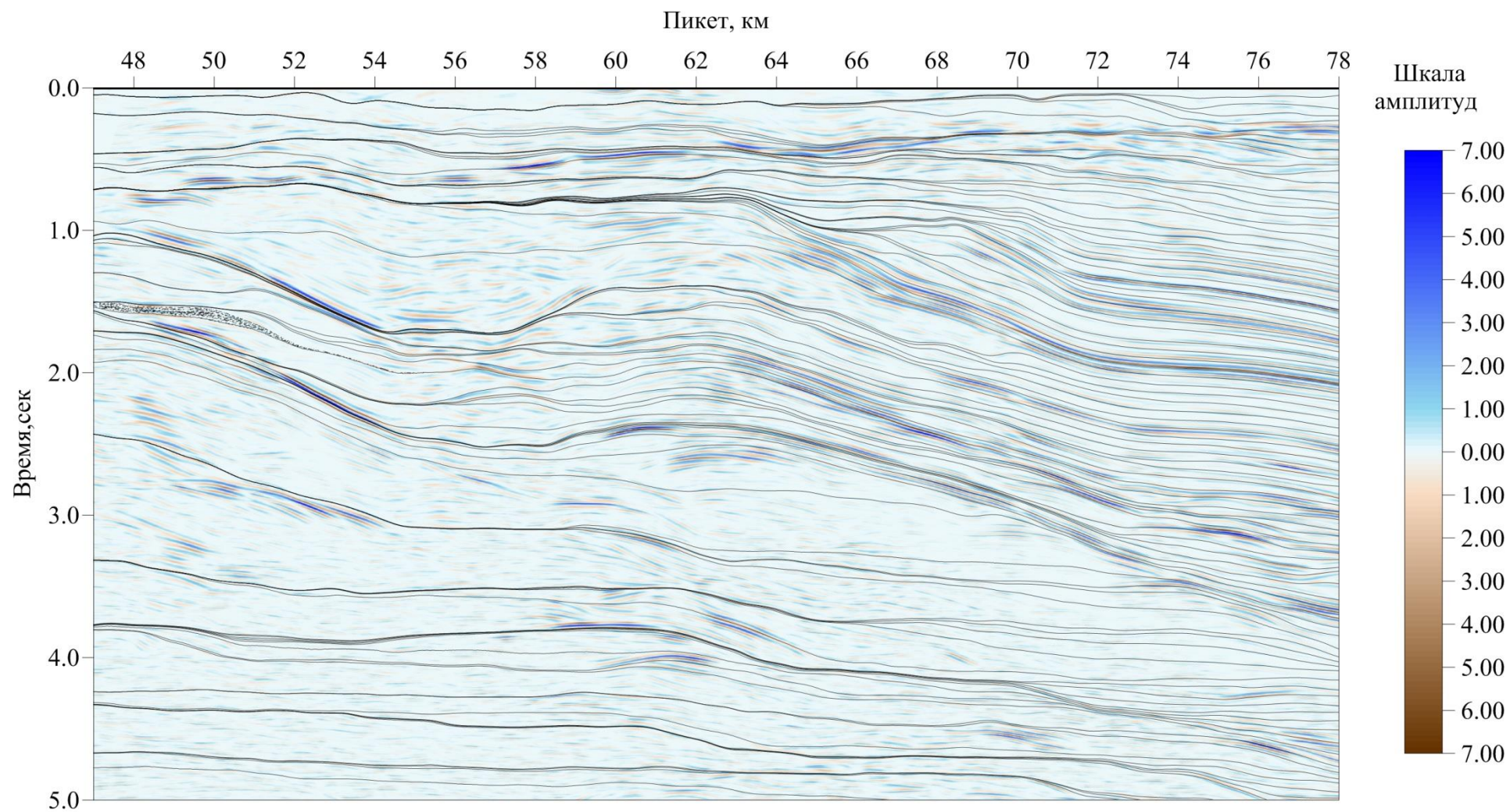


Рис. 5. Разрез после сферического зеркала с изолиниями сеймостратиграфического разреза

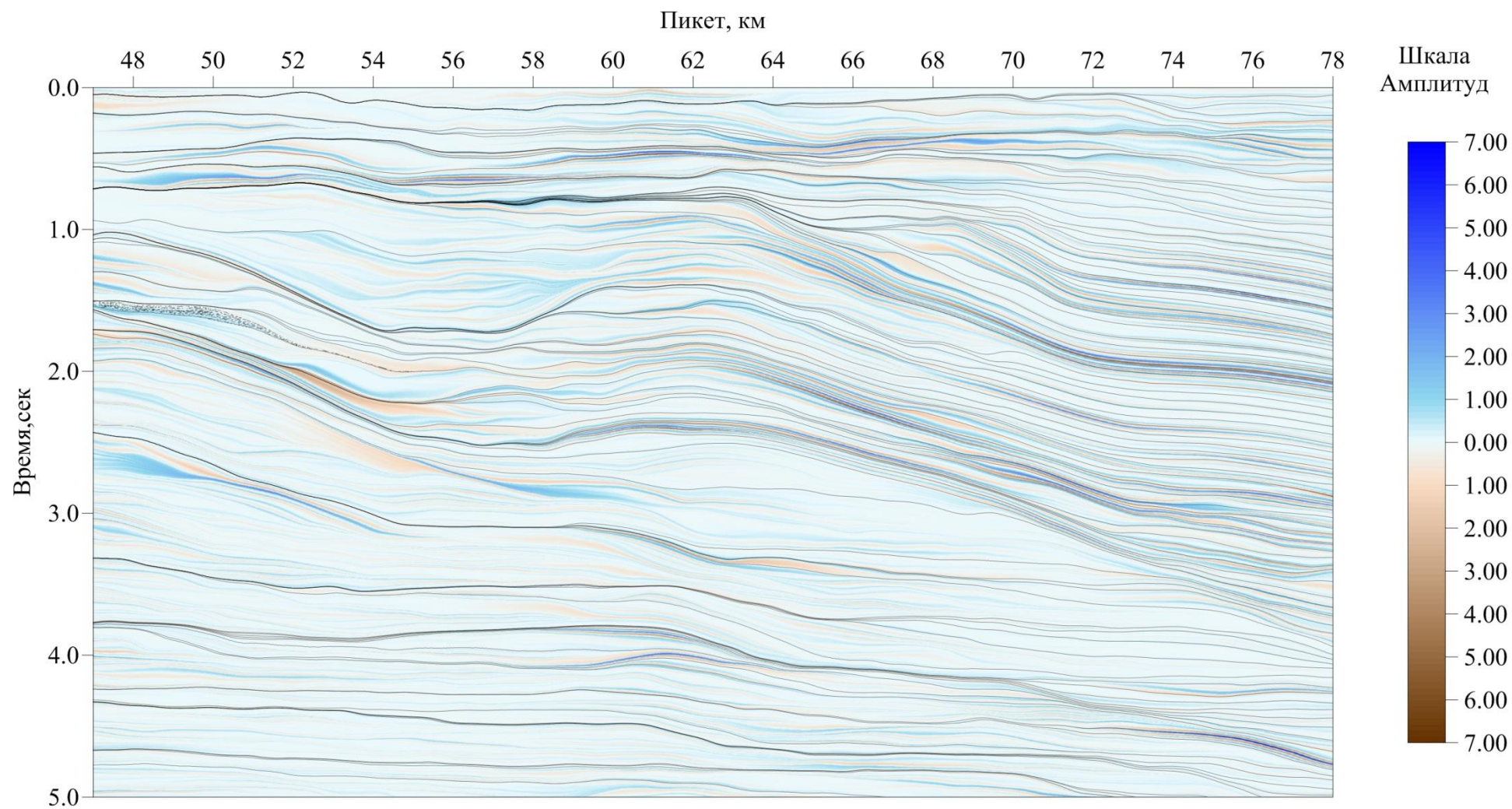


Рис. 6. Сейсмостратиграфический разрез амплитуд с изолиниями сейсмостратиграфии

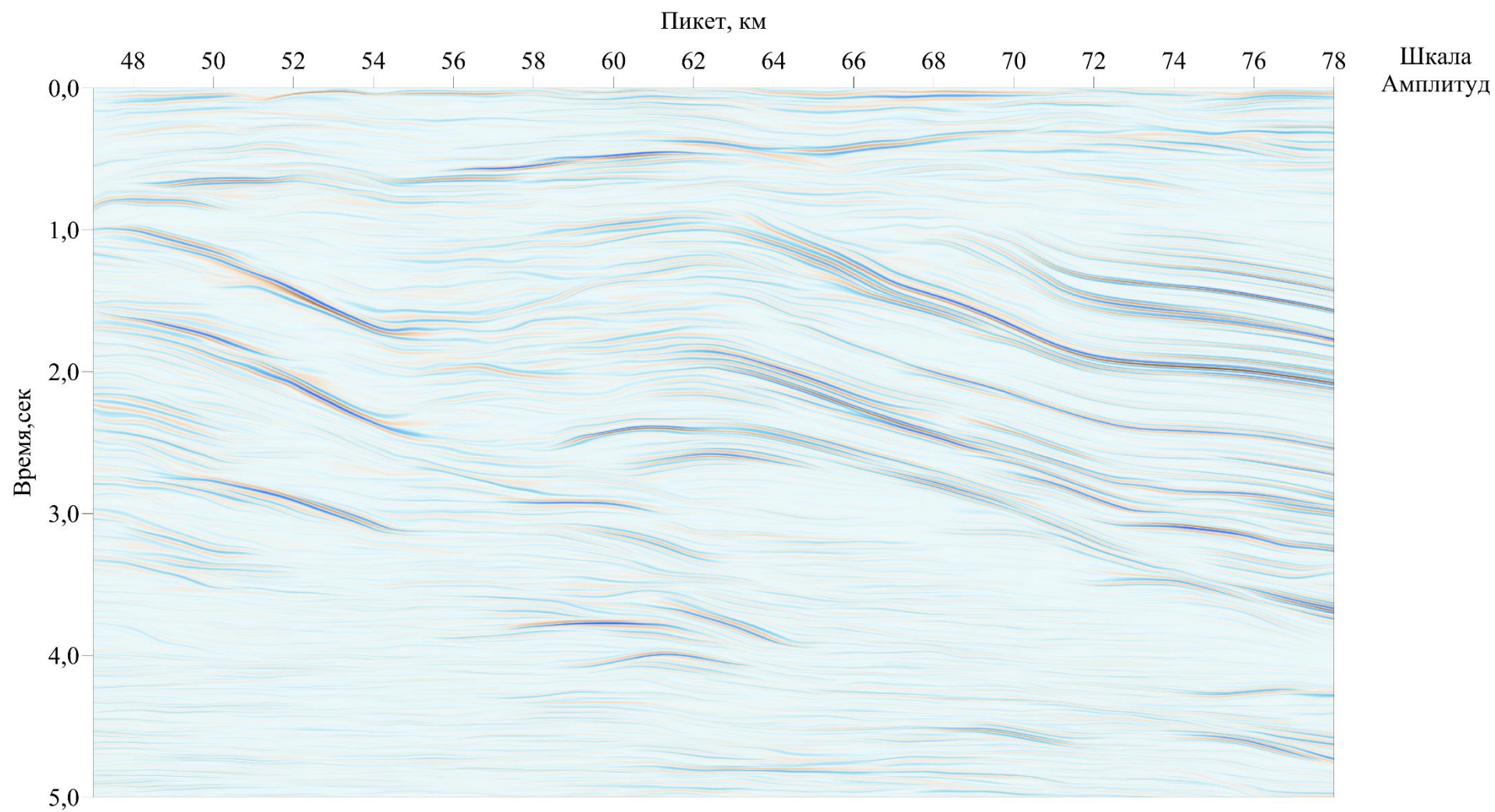


Рис. 7. Разрез сеймостратиграфического суммирования

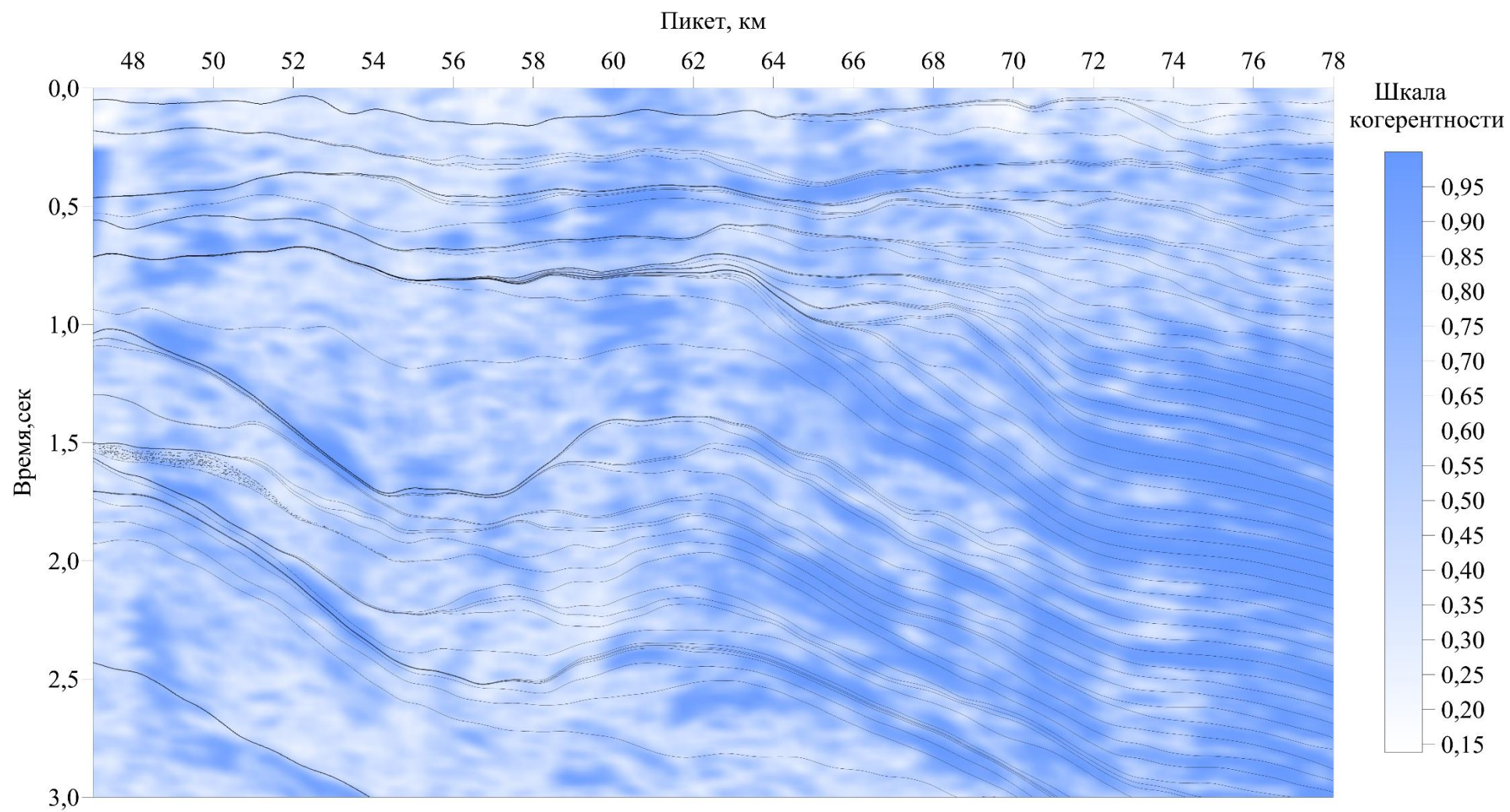


Рис. 8. Сейсмостратиграфический разрез когерентности

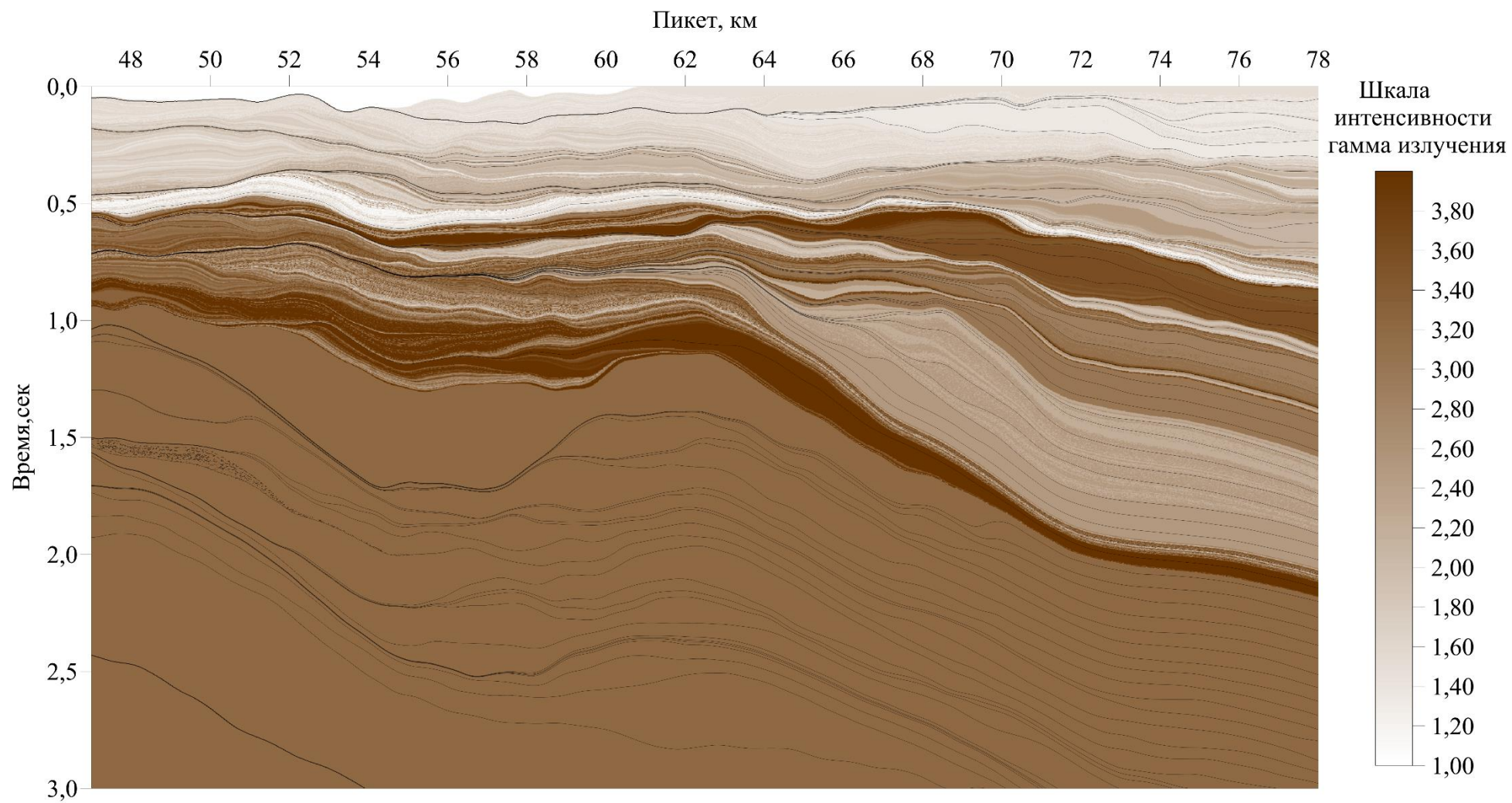


Рис. 9. Сейсмостратиграфический разрез нейтронного гамма каротажа