

Прогноз упругих свойств маломощных однородных пластов по сейсмическим данным

Алексеева П. А., Керусов И. Н.

Аннотация

В основе многих атрибутов и инверсионных преобразований, решающих задачу извлечения информации об упругих характеристиках среды, лежит уравнение Цоеппригца или его аппроксимации, рассчитанные для границы двух полупространств. В реальной среде сейсмический сигнал находится в интерференции в результате отражения от кровли и подошвы отдельных маломощных слоёв или их пачек, упругие свойства которых отличаются от граничащих с ними пород. В таких средах происходит расхождение экспериментальных зависимостей от теоретических для амплитуды коэффициента отражения, построенных для полупространств. В случае однородного маломощного слоя, изменение амплитудно-частотной характеристики коэффициента отражения связано одновременно с коэффициентами отражения от кровли и подошвы слоя и с временем пробега волны в слое. Детальный анализ амплитуды коэффициента отражения от маломощного однородного слоя с использованием технологии спектральной декомпозиции позволяет выделить изменение только коэффициентов отражения вне зависимости от мощности. Предложенный метод прогноза упругих свойств маломощных слоёв основан на аналитическом выводе коэффициента отражения от маломощного однородного слоя, согласно которому, квадрат амплитуды коэффициента отражения параболически зависит от квадрата частоты. Коэффициент аппроксимации при нулевой степени аргумента характеризует преимущественно свойства среды в отличие от коэффициентов при первой и второй степени, которые зависят, как от свойств, так и от мощности слоя. Таким образом, целесообразно применять коэффициент аппроксимации при нулевой степени аргумента в качестве атрибута волнового поля для прогноза упругих свойств маломощных слоёв в межскважинное пространство. Ярким примером маломощных относительно однородных слоёв являются тонкие русла. Определение свойств пород, заполняющих русловые объекты, способствует выявлению более песчаных участков, которые перспективны для дальнейшей разработки месторождения.

Ключевые слова:

спектральная декомпозиция, маломощный слой, среднеюрские отложения

ПРОГНОЗ УПРУГИХ СВОЙСТВ МАЛОМОЩНЫХ ОДНОРОДНЫХ ПЛАСТОВ ПО СЕЙСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

П.А. Алексеева^{1,2}, И.Н. Керусов²

¹ Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 119234, Россия, г. Москва, Ленинские Горы, 1, стр.1; e-mail: polishaalex@hotmail.com

² ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», 109028, Россия, г. Москва, Покровский б-р, д. 3, стр. 1; polina.alexeeva@lukoil.com

ВВЕДЕНИЕ

Прогноз свойств внутри маломощных пластов или их пачек вызывает непрерывный интерес, связанный с доизучением уже открытых крупных месторождений и с принадлежностью многих маломощных залежей углеводородов, в частности, русловых объектов, к трудноизвлекаемым запасам (ТРИЗ) [М. Фёдорова и др., 2016]. Основная проблема прогноза свойств маломощных объектов по сейсмическим данным заключается в том, что амплитудно-частотная и фазовая характеристика отражения от однородного слоя или пачки слоёв зависит от временной мощности [G. Partyka, 1999]. Данный эффект ведёт к изменению как амплитуды при нормальном падении, так и зависимостей амплитуды от угла падения (AVA-зависимостей) [W. Hamlyn, 2014], поэтому результаты, полученные по прогнозу упругих параметров на основе AVA-инверсии, не всегда отображают истинные упругие свойства внутри маломощных объектов [K. Warpenaar, 1999].

В работе рассмотрены теоретические основы и применение атрибутов, характеризующих преимущественно изменение только коэффициентов отражения от кровли и подошвы однородного маломощного слоя. Данный подход основан на аналитической аппроксимации коэффициента отражения от маломощного слоя [M. В. Widess, 1973; H. Chung, 1994]. Согласно полученной аппроксимации, квадрат амплитуды коэффициента отражения параболически зависит от квадрата частоты. Коэффициент аппроксимации “К” при нулевой степени аргумента характеризует изменение преимущественно коэффициентов отражения от кровли и подошвы слоя. Применение данного метода проиллюстрировано на модельных данных, построенных полноволновым методом с использованием программы Tesserat для разных моделей сред. Для расчёта амплитуд на разных частотах применялась спектральная декомпозиция на основе вейвлет-преобразования. Результаты показали, что влияние мощности на атрибут К незначительно по сравнению с изменением свойств в зоне, где мощность меньше 1/8 длины волны. Таким образом, данный атрибут целесообразно применять для прогноза упругих свойств маломощного пласта в межскважинное пространство.

Применение методики анализа амплитуды отражения в зависимости от частоты проиллюстрировано на реальных сейсмических данных 3D Западно-Сибирской провинции. В качестве целевого интервала рассмотрены среднеюрские отложения (тюменская свита). Отложения верхней подсвиты тюменской свиты являются континентальными аллювиально-озёрными [А. Э. Конторович, 1975], для которых характерно наличие маломощных русловых отложений. Основная проблема данных отложений заключается в том, что свойства русел могут значительно изменяться по

латерали и представлять из себя как преимущественно песчанистый материал, так и глинистый. В связи с этим применение предложенной автором методики способствует выявлению изменения характера заполнения русловых объектов и, при большой выборке скважинных данных, определению коллекторских свойств.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА

Согласно работам [Chung, 1994] и [Widess, 1973], сейсмический импульс отраженной волны от маломощного однородного слоя при нормальном падении может быть аппроксимирован функцией косинуса. Максимальная амплитуда полученной трассы может быть рассчитана следующим образом (формула 1):

$$A_{max} = \left\{ (r_1 + r_2)^2 \left[\left(1 - 2 \left(\frac{\pi h}{\lambda} \right)^2 \right)^2 \right] + (r_1 - r_2)^2 \left(\frac{2\pi h}{\lambda} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Где h - мощность пласта, λ - длина волны, r_1 - коэффициент отражения от кровли и r_2 - коэффициент отражения от подошвы.

Упрощая формулу (1), выражение для максимальной амплитуды можно свести к следующему виду:

$$A_{max}^2 = K + G\omega^2 + L\omega^4 \quad (2)$$

, где ω - циклическая частота, t_h – одинарное время пробега в слое, коэффициенты K , G , L выражаются как:

$$K = (r_1 + r_2)^2 \quad (3)$$

$$G = t_h^2 \left(-(r_1 + r_2)^2 + (r_1 - r_2)^2 \right) \quad (4)$$

$$L = \frac{1}{4} (r_1 + r_2)^2 \cdot t_h^4 \quad (5)$$

Таким образом, квадрат максимальной амплитуды коэффициента отражения параболически зависит от квадрата частоты для акустического случая. Кроме того, коэффициент K зависит только от свойств среды и не зависит от временной мощности в отличие от коэффициентов G и L . Выражение (2) выведено для нормального падения. Для анализа области применимости формулы (2) необходимо рассмотреть, как изменяется данное выражение для упругого случая.

Для расчёта аппроксимации отражения от маломощного слоя при падении волны под углом необходим учёт образования обменных волн. Как показано в работе [С. Луо, 2018], амплитуда обменных волн может быть достаточно высокой.

В связи с чем, для корректного анализа изменения амплитуды необходим учёт четырёх отражений, находящихся в интерференции: PP, PPPP, PSPP, PPSP. Отражение PSSP является малоамплитудным по сравнению с вышеописанными отражениями. Отражения PSPP и PPSP регистрируется одновременно, поэтому итоговых отражений 3. Согласно работам [Chung, 1994], центральный лепесток импульса Рикера, который приближен к статистическому сейсмическому импульсу, может быть аппроксимирован функцией косинуса в случае интерференционного отражения от совокупности из трёх

отражений при малой мощности пласта по сравнению с длиной волны. Таким образом, коэффициент отражения выражается следующей формулой:

$$R(t) = r_1 \cos \left\{ \left(t - \frac{h}{V_{p2}} \right) \frac{2\pi}{T} \right\} + r_2 \cos \left\{ \left(t + \frac{h}{V_{p2}} \right) \frac{2\pi}{T} \right\} + r_3 \cos \left\{ \left(t + \frac{h}{V_{s2}} \right) \frac{2\pi}{T} \right\} \quad (6)$$

Где r_1, r_2, r_3 характеризуют коэффициенты отражения PP, PPPP и совместно PSPP и PPSP волн соответственно, V_{p2}, V_{s2} , - скорости продольной и поперечной волн во втором слое, T - период волны.

При условии малой мощности относительно длины волны верно следующее допущение:

$$\cos \left(\frac{\omega h}{V_{p2}} \right) = 1 - 2 \sin^2 \left(\frac{\omega h}{2V_{p2}} \right) \approx 1 - 2 \left(\frac{\omega h}{2V_{p2}} \right)^2 \quad (7)$$

При подстановке (7) в (6) отражение может быть представлено в виде:

$$R(t) = \cos(\omega t) \left\{ r_1 \left(1 - 2 \left(\frac{h\pi}{V_{p2}T} \right)^2 \right) + r_2 \left(1 - 2 \left(\frac{h\pi}{V_{p2}T} \right)^2 \right) + r_3 \left(1 - 2 \left(\frac{h\pi}{V_{s2}T} \right)^2 \right) \right\} + \sin(\omega t) \left\{ r_1 \frac{2h\pi}{V_{p2}T} - r_2 \frac{2h\pi}{V_{p2}T} - r_3 \frac{2h\pi}{V_{s2}T} \right\} \quad (8)$$

Для упрощения поиска максимумов амплитуды отражения функцию $R(t)$ можно представить в следующем виде:

$$R(t) = M_1 \cos(\omega t) + M_2 \sin(\omega t) \quad (9)$$

$$\frac{\partial R(t)}{\partial t} = -\omega M_1 \sin(\omega t) + \omega M_2 \cos(\omega t) = 0 \quad (10)$$

$$\operatorname{tg}(\omega t) = \frac{M_2}{M_1} \quad (11)$$

Так как в рамках данной задачи интересует значение аргумента, приуроченное к кровле пласта, то:

$$t_{max} = \frac{\operatorname{arctg} \left(\frac{M_2}{M_1} \right)}{\omega} \quad (12)$$

При подставлении (12) в (8), максимальное значение трассы равно:

$$R(t_{max}) = M_1 \frac{M_1}{\sqrt{M_1^2 + M_2^2}} + M_2 \frac{M_2}{\sqrt{M_1^2 + M_2^2}} \quad (13)$$

Согласно выражению (13), максимальную амплитуду коэффициента отражения можно представить в следующем виде:

$$A_{max}^2 = K^2 - G \omega^2 + L \omega^4 \quad (14)$$

, где

$$K = r_1 + r_2 + r_3 \quad (15)$$

$$G = \left(r_1 t_{hp}^2 - r_2 t_{hp}^2 - r_3 t_{hs}^2 \right) (r_1 + r_2 + r_3) + t_{hp}^2 r_1 + r_2 t_{hp}^2 + r_3 t_{hs}^2 \quad (16)$$

$$L = \frac{1}{4} (r_1 t_{hp}^2 - r_2 t_{hp}^2 - r_3 t_{hp}^2) \quad (17)$$

Где, t_{hp} , t_{hs} – время пробега продольной и поперечной волны в слое.

Таким образом, согласно выражениям (2) и (14), квадрат максимальной амплитуды отражения от маломощного слоя параболически зависит от квадрата циклической частоты как для акустического, так и для упругого случая.

На рисунке 1 показаны трассы для угла падения 10° для двух моделей сред для мощности слоя 5 м. Трассы построены полноволновым методом с использованием импульса Рикера и аппроксимацией по формуле 8, центральная частота 40 Гц. На рисунке видно, что предложенная модель достаточно хорошо аппроксимирует коэффициент отражения.

Для анализа полученных зависимостей на рисунках 2 и 3 показано изменение максимальной амплитуды трассы в зависимости от частоты и мощности слоя для двух различных моделей в случае нормального падения. Моделирование наблюденных данных выполнено с использованием полноволнового метода, в качестве источников использовались импульсы Рикера с различной частотой. Наилучшее сходство теоретических и наблюденных значений происходит при мощности слоя меньше $1/10$ длины волны. В случае мощности слоя больше $1/10$ длины волны, но меньше $1/8$ ошибка достигает 10%. Несмотря на частичную несогласованность теоретических и наблюденных абсолютных значений максимальной амплитуды трассы, зависимости, которые иллюстрирует аналитическое решение, отображают основные закономерности, полученные полноволновым методом. Основная особенность данных графиков заключается в том, что амплитуда сильнее изменяется в зависимости от частоты, чем от мощности, как для первой, так и для второй модели. При этом, на высоких частотах диапазон изменения амплитуды шире, чем на низких.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что возможно использовать атрибуты K, G и L для анализа волнового поля, так как аппроксимация иллюстрирует основные особенности изменения максимальной амплитуды трассы в зависимости от мощности и частоты. Но прежде чем перейти к использованию аппроксимаций на реальных данных, необходимо провести анализ на модельных данных.

МОДЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Согласно выражениям (2) и (14), атрибуты K, G и L характеризуют коэффициенты параболической зависимости для отражения от кровли пласта. Для анализа применимости полученных результатов выполнено моделирование трасс с использованием полноволнового метода в программе Tesserai для слоёв с изменяющейся мощностью и свойствами.

Согласно формуле 14, коэффициент K зависит преимущественно от свойств слоёв, в отличие от коэффициентов G и L. Поэтому для проверки выведенной формулы будет рассмотрено, как изменяются атрибуты коэффициента отражения от трёхслойной модели среды с изменяющейся мощностью 2-го слоя и скоростью 1-го (модель 1), 2-го (модель 2) и 3-го (модель 3) слоёв. Параметры моделей 1 и 2 представлены соответственно в таблицах 1-3. При моделировании использовался широкополосный импульс с полезной

частотой от 10 до 40 Гц с добавлением шумовой составляющей (5%), импульс показан на рисунке 4.

По результатам моделирования построены карты атрибутов K, G и L в зависимости от свойств среды и мощности 2-го слоя (Рис. 5 – Рис. 7). Для расчёта атрибутов была выполнена следующая последовательность действий:

- 1) Выполнена корреляция отражения вдоль изучаемого сейсмического горизонта, приуроченного к кровле пласта.
- 2) Рассчитана спектральная декомпозиция с использованием вейвлет-преобразования с комплексным вейвлетом Морле.
- 3) Измерены (сняты) значения частот вдоль горизонта.
- 4) Построена параболическая аппроксимация квадрата амплитуды в зависимости от квадрата частоты для каждой точки вдоль горизонта
- 5) Коэффициентами параболической аппроксимации являются соответственно атрибуты K, G и L.

По анализу полученных карт, изменение атрибута K для моделей 1 и 3 характеризует преимущественно изменение скоростей в области маломощного пласта (до 12 метров), в отличие от атрибутов L и G. Именно такой диапазон мощностей наиболее характерен для русел тюменской свиты. Для модели 2 нет такого сильного разделения по свойствам и мощности, однако параметр K, в отличие от атрибутов L и G, сильнее изменяется в зависимости от упругих свойств. Параметр K, согласно формуле 14, соответствует коэффициенту аппроксимации при нулевой степени и, следовательно, характеризует пересечение графика с осью ординат. Как показано на графиках зависимости квадрата амплитуды от квадрата частоты (Рис. 8 – Рис. 10) для рассчитанных моделей, выбранная зависимость хорошо аппроксимирует наблюдаемые значения. Кроме того, на каждом графике происходит группирование аппроксимирующих парабол в зависимости от изменения скорости. Диапазон изменения значений каждой группы сужается в зависимости от уменьшения частоты, и, следовательно, точка пересечения с осью ординат должна наиболее точно характеризовать отличие каждой группы. В связи с чем, параметр K характеризует изменение преимущественно свойств среды, а не мощности.

Таким образом, аппроксимирующая зависимость для максимальной амплитуды отражения позволяет различить эффекты, вызванные изменением свойств от изменения мощности. Такой подход был проанализирован на 3D данных Западно-Сибирской провинции в интервале тюменской свиты, где средняя мощность русел составляет менее 12 метров, что составляет менее 1/8 длины волны.

ПРИМЕНЕНИЕ

Для применения вышеописанного метода использовались сейсмические данные 3D, участок работ расположен в Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. Целевым интервалом исследования на данном участке являются среднеюрские (тюменская свита) аллювиально-озёрные отложения. Интерес к данным отложениям вызван тем, что они нефтеносны и относятся к ТриЗам, в связи с чем на их разработку предоставляются дополнительные налоговые льготы в Российской Федерации.

На изучаемой территории Западно-Сибирской провинции по скважинным данным время пород датируется с формирования триасовых отложений, которые на момент трансгрессии моря представляли собой гористую местность с протяженными хребтами. При трансгрессии уровня моря началось накопление континентальных отложений, относящихся к пролювиально-делювиальным отложениям, позже в средней юре отложения сменились на аллювиально-озёрные, территория была представлена извилистыми реками, озерами и болотами. Во время накоплений отложений средней юры уровень моря также незначительно изменялся, что вело к изменению конфигурации русловых систем [F. Rizzetto, 2012]. Следующим этапом было постепенное углубление морского бассейна, и шельфовый бассейн распространился по всей описываемой территории.

В результате высокого контраста акустических свойств между юрскими и триасовыми отложениями, коэффициент отражения от доюрского комплекса оказывает сильное влияние на волновую картину вышележащих отложений. Поэтому для применения вышеописанного спектрального метода анализировались пласты ЮК₂₋₃ (верхняя подсвита тюменской свиты), так как влияние отражения от кровли триасовых отложений не столь значительно по сравнению с нижележащими аллювиально-озёрными отложениями. Кроме того, данный интервал, согласно скважинным данным, характеризуется высокой латеральной и вертикальной неоднородностью и маломощными отложениями, связанными с речными системами, озёрами и болотами.

Основным методом для выделения речных систем в тюменской свите является метод RGB-смешивания частот, полученных в результате спектральной декомпозиции. Данный метод способствует картированию тонких маломощных русел и широких речных долин. Кроме того, по данному атрибуту выделяются различные области с преобладанием в спектре определённой частоты (красного, зелёного или синего оттенка) (Рис. 11). Одним из факторов, влияющим на вариативность частоты, является изменение временной мощности. Однако изменение времени пробега волны в слое зависит как от мощности слоя, так и от упругих параметров породы, которые ведут к изменению коэффициента отражения. Следовательно, анализ отдельных амплитуд или RGB-смешивание частот способствует выделению областей, которые отличаются по геометрии и свойствам, но приурочить аномалии к изменению только мощности или свойств пласта не является возможным.

В связи с чем, для прогноза свойств были проанализированы атрибуты K, G, L, описанные в предыдущей главе. Для расчета атрибутов K, G, L была выполнена спектральная декомпозиция с использованием непрерывного вейвлет-преобразования с комплексным вейвлетом Морле; диапазон частот, который использовался для построения параболической зависимости, изменялся от 20 до 50 Гц.

Для анализа независимости полученных атрибутов рассмотрена их взаимная корреляция, которая показала, что атрибуты K, G и L являются независимыми (Рис. 12), так как коэффициенты корреляции между K и L – 0.5, K и G – 0.06, G и L – 0.3.

Кроме того, как было сказано выше, на атрибуты волнового поля оказывает сильное влияние одновременно изменение мощности слоя и свойств пласта, поэтому выполнено сопоставление коэффициентов K, G и L с другими атрибутами волнового поля для анализа возможности получения дополнительной уникальной информации, которую не предоставляли другие атрибуты (Рис. 13). Для сопоставления были рассчитаны атрибуты мгновенной частоты, RMS-амплитуды и *sweetness*. В таблице 4 приведены коэффициенты

корреляции между атрибутами. По полученным результатам показано, что атрибут L практически идентичен атрибуту sweetness и RMS-амплитуде; зоны, выделяемые по атрибуту G, схожи с атрибутом мгновенной частоты. Идентичность информации, полученной по атрибутам L и G, с другими атрибутами связана с тем, что данные атрибуты одновременно зависят и от свойств пласта, и от мощности, в отличие от атрибута K, который является независимым и несёт в себе дополнительную информацию о свойствах разреза, как было показано в выведенных выше формулах. Таким образом, параметр K можно использовать как для прогноза свойств, так и для выделения дополнительных фациальных областей, которые не проявляются по другим атрибутам.

Согласно теоретическим представлениям, атрибут K характеризует свойства маломощных относительно однородных слоёв, примером таких сред могут являться русла. Для выделения геометрии маломощных русел использовался атрибут RGB-смешивания частот частично угловых сумм. На данном атрибуте выделяются тонкие русла разветвлённой реки и прирусловые отмели, согласующиеся со скважинными данными (Рис.14). Основными данными для выделения фаций по скважинам являлся гамма-каротаж и результаты описания керна [В.А. Жемчугова, 2014]. Методика выделения фациальных зон по каротажным кривым основана на опубликованных материалах [В.А. Жемчугова, 2014; А. В. Ежова, 2013]. Вдоль выделенных русел разветвлённой реки выполнен расчет атрибута K. Данный атрибут сопоставлен со средней скоростью продольных волн в скважинах в интервале выделенных русел. Коэффициент корреляции составляет порядка 0.86 (Рис. 15). Таким образом, данный атрибут может характеризовать изменение скорости в пласте. Кроме того, изменение скорости связано прямо пропорционально с пористостью в изучаемом интервале. Следовательно, данный атрибут может характеризовать, как изменение упругих свойств внутри пласта, так и на качественном уровне иллюстрировать изменение коллекторских свойств.

В дополнение к проведённому анализу были выделены фациальные зоны с использованием атрибута мгновенной частоты и атрибута AVB [М. Kelly, 1992]. Повышенные значения атрибута мгновенной частоты характеризуют области широких долин меандрирующих рек (Рис. 16), имеющие по скважинным и сейсмическим данным более ранний возраст по сравнению с разветвлёнными реками. Атрибут AVB способствовал выделению зон с различной конфигурацией пластов [М. Kelly, 1992; П.А. Алексеева, 2021]. Повышенные значения атрибута AVB характеризуют слои с контрастным изменением свойств в кровле и постоянными или регрессивным изменением свойств в пласте. По данному атрибуту выделены пойменные участки (Рис. 17), кроме того, повышенное значение атрибута также наблюдается в областях, приуроченных к меандрирующим и разветвленным рекам. Однако в связи с недостаточной скважинной информацией данные зоны не были отнесены к отдельной фациальной области.

Таким образом, по результатам выполненного атрибутного анализа и на основе скважинной информации была построена фациальная карта, иллюстрирующая временно заливаемые участки пойм, широкие долины меандрирующих рек, более молодые русла разветвленных рек и прирусловые отмели (Рис. 18). Использование атрибута K позволило провести анализ изменения свойств внутри маломощных русел на качественном уровне. Повышенные значения атрибута K характеризуют увеличение скоростей, и, следовательно, увеличение песчанистого материала внутри русел. В связи с небольшим количеством скважинных данных, изменение коллекторских свойств внутри выделенных русел можно проанализировать только на качественном уровне.

ВЫВОДЫ

В данной работе был рассмотрен новый подход к анализу маломощных слоёв, который основан на детальном изучении амплитуды отражения в зависимости от частоты с использованием технологии спектральной декомпозиции. Актуальность описанной методики заключается в том, что на амплитудно-частотный и фазовый спектр отражения от маломощного слоя одновременно влияет как изменение мощности слоя, так и изменение свойств, поэтому использование стандартных атрибутов не позволяет оценить изменение свойств маломощных отложений. Метод, предложенный авторами, позволяет разделить эффекты, вызванные изменением свойств от временной мощности.

В статье были изложены теоретические основы данного метода, которые показали, что квадрат амплитуды отражения от однородного маломощного слоя параболически зависит от квадрата циклической частоты отражения. Коэффициент аппроксимации при нулевой степени аргумента зависит преимущественно от свойств пласта и не зависит от мощности, в отличие от коэффициентов при первой и второй степени. Данные теоретические предположения были протестированы на модельных данных. В результате выполненного моделирования было показано, что вариации атрибута K , вызванные изменением мощности 2-го слоя, практически не проявляются на фоне изменения упругих свойств 1-го, 2-го или 3-го слоя, в отличие от параметров G и L , на которые в равной степени влияет как изменение мощности, так и изменение свойств.

Использование атрибутов K , G и L было проиллюстрировано на данных Западно-Сибирской провинции в интервале тюменских отложений. Применение предложенного авторами метода совместно с широко используемыми методами спектральной декомпозиции и атрибутного анализа способствовало получению дополнительной уникальной информации о вещественных характеристиках пластов, определяющих вариации волнового поля в пределах маломощных русловых тел.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеева П.А., Гриневский А.С, Керусов И.Н., Ампилов Ю.П. Сопоставительный анализ различных спектральных методов при решении интерпретационных задач сейсморазведки// Геофизика, 2021, №2, с. 64-71.
- Ежова А. В., Тен Т. Г., Литология нефтегазоносных толщ, Томск, Томский политехнический университет, 2013, 122с.
- Жемчугова В. А., Практическое применение резевуарной седиментологии при моделировании углеводородных систем, Москва, РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина, 2014, 297с.
- Конторович А.Э., Нестеров И.И., Салманов Ф.К., Сурков В.С., Трофимук А.А., Эрвье Ю.Г., Геология нефти и газа Западной Сибири, Москва, Недра, 1975, 680с.
- Фёдорова М., Кирзелёва О., Катаев О., Ананьева Е., Осипова Ю., Тюменская свита. Методология создания концептуальных моделей // Геология и Геофизика, 2016, №11, с.60-63.
- Chung H., Seismic properties of thin beds, Calgary, A dissertation submitted to the faculty of graduate studies in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy, 1994, 282p.
- Kelly M. Method of geophysical exploration // Patent, 5136552, US, 1992.

- Luo C., Li X., Huang G., Joint PP and PS AVA waveform inversion using propagator matrix forward modeling // SEG 88th annual Meeting, 2018, pp. 595-599.
- Partyka G., Interpretation application of spectral decomposition in reservoir characterization // The Leading Edge, 1999, Vol 18 (3), pp. 353-360.
- Rizzetto F., Tosi L, Rapid response of tidal channel networks to sea-level variations // Global and planetary change, 2012, Vol. 92-93, pp. 191-197.
- Wapenaar K., Wijngaarden A., Geloven W., Lrij T., Apparent AVA effects of fine layering // Geophysics, 1999, Vol. 64 (6), pp. 1939-1948.
- Wes H., Thin beds, tuning, and AVO // Leading Edge, 2014, Vol. 33 (12), 1394-1396.
- Widess M.B., How thin is a thin bed // GEOPHYSICS, 1973, Vol. 38 (6), pp. 1176-1180

Рис. 1. Сопоставление трассы, рассчитанной полноволновым методом (сплошная синяя линия), и трассой, рассчитанной по формуле 8 (пунктирная красная линия).

Рис. 2. Сопоставление максимальных амплитуд трасс, построенных полноволновым методом с использованием импульсов Рикера различной частоты (красные точки), с аппроксимацией максимальной амплитуды (черные линии) по формуле 14 для модели контрастного слоя (в).

Рис. 3. Сопоставление максимальных амплитуд трасс, построенных полноволновым методом с использованием импульсов Рикера различной частоты (красные точки), с аппроксимацией максимальной амплитуды (черные линии) по формуле 14 для модели переходного слоя (в).

Рис. 4. Широкополосный импульс с шумовой составляющей 5%

Рис. 5. Изменение атрибутов L (а), G (б), K (в) для модели 1

Рис. 6. Изменение атрибутов L (а), G (б), K (в) для модели 2

Рис. 7. Изменение атрибутов L (а), G (б), K (в) для модели 3

Рис. 8. Графики зависимостей квадрата амплитуды от квадрата частоты для модели 1

Рис. 9. Графики зависимостей квадрата амплитуды от квадрата частоты для модели 2

Рис. 10. Графики зависимостей квадрата амплитуды от квадрата частоты для модели 3

Рис. 11. RGB-смешивание частот частично угловых сумм

Рис. 12. Анализ взаимной корреляции атрибутов K, G, L

Рис. 13. Атрибуты волнового поля в интервале отложений ЮК₂₋₃

Рис. 14. RGB-смешивание частот частично угловых сумм с вынесенными границами русел разветвлённой реки (голубая линия), прирусловой отмели (красная линия) и скважинной информацией

Рис. 15. Распространение атрибута K вдоль русел и его соотношение со скважинными данными

Рис. 16. Атрибут мгновенной частоты с вынесенными границами долин меандрирующих рек и скважинной информацией

Рис. 17. Атрибут AVB с вынесенными границами временно заливаемых участков пойм (красный), фациальных зон, выделенных по другим атрибутам (чёрный) и скважинной информацией

Рис. 18. Фациальная карта отложений ЮК₂₋₃ с выделенными областями временно заливаемых участков пойм (зелёный), пойменных отложений (жёлтый), широких долин меандрирующих рек (бежевый) и прирусловых отмелей (коричневый)

Табл. 1. Параметры модели 1

слой	Vs	Vp	плотность
1	2250	3200-3800	2.2
2	2300	3500	2.1
3	2550	4400	2.4

Табл. 2. Параметры модели 2

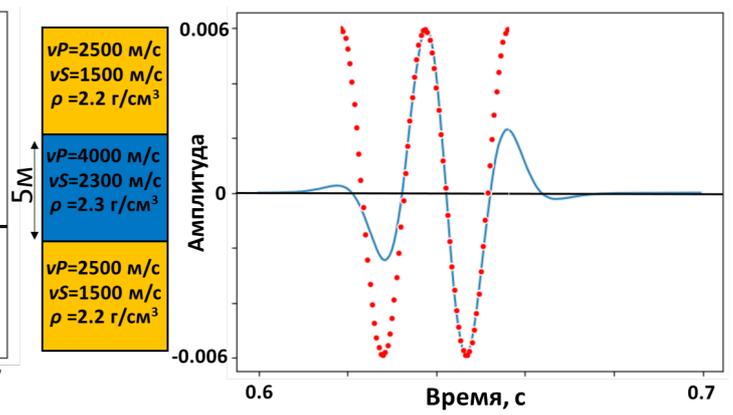
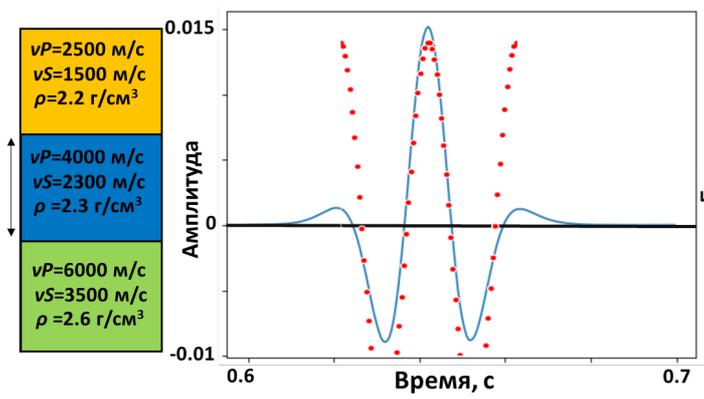
слой	Vs	Vp	плотность
1	2200	3000	2.1
2	2300	3400-4200	2.32
3	2230	3200	2.1

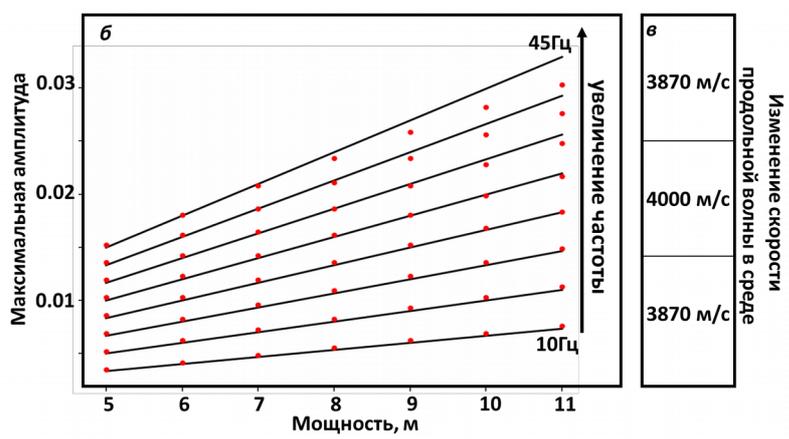
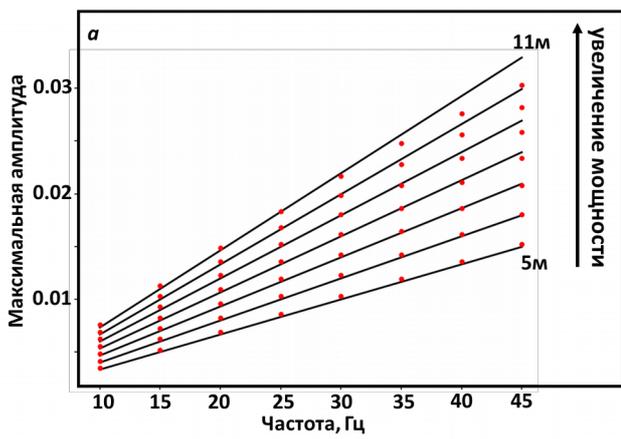
Табл. 3. Параметры модели 3

слой	Vs	Vp	плотность
1	2550	4400	2.4
2	2300	3500	2.1
3	2350	2800-4000	2.2

Табл. 4 Коэффициенты корреляции атрибутов волнового поля

	Sweetness	RMS-амплитуда	Среднее значение мгновенной частоты
K	-0.06	-0.02	-0.13
G	-0.2	0.12	0.67
L	0.9	0.86	-0.3

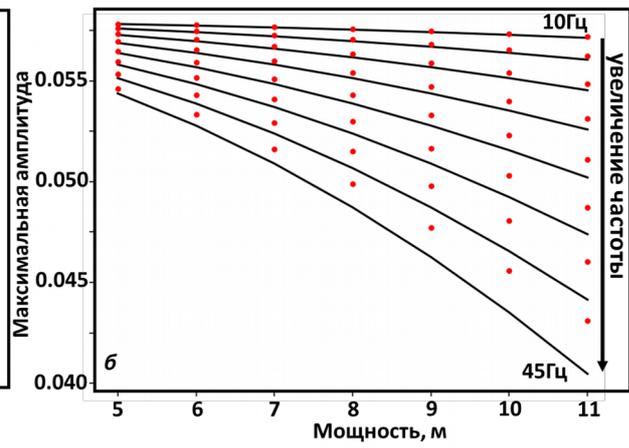
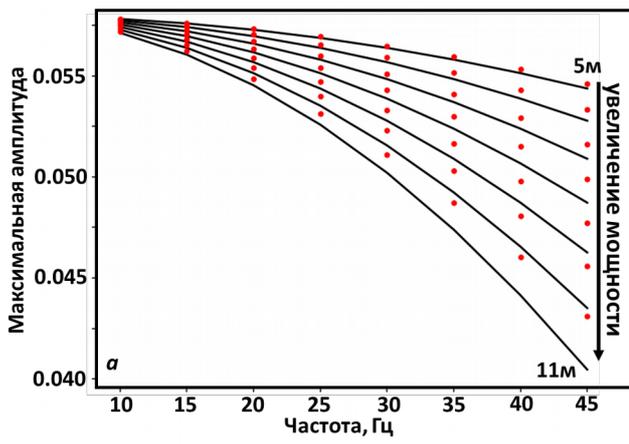




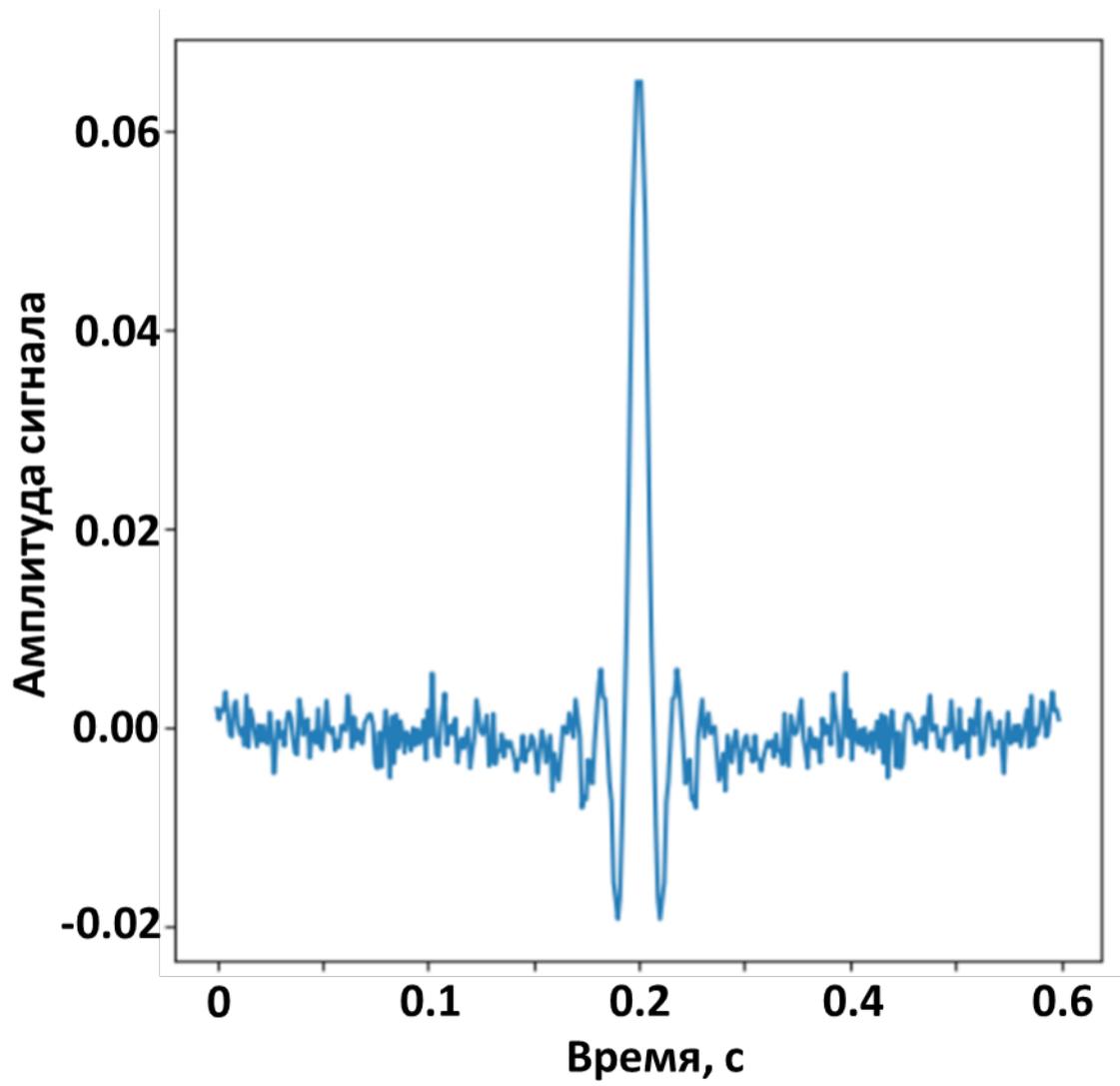
в

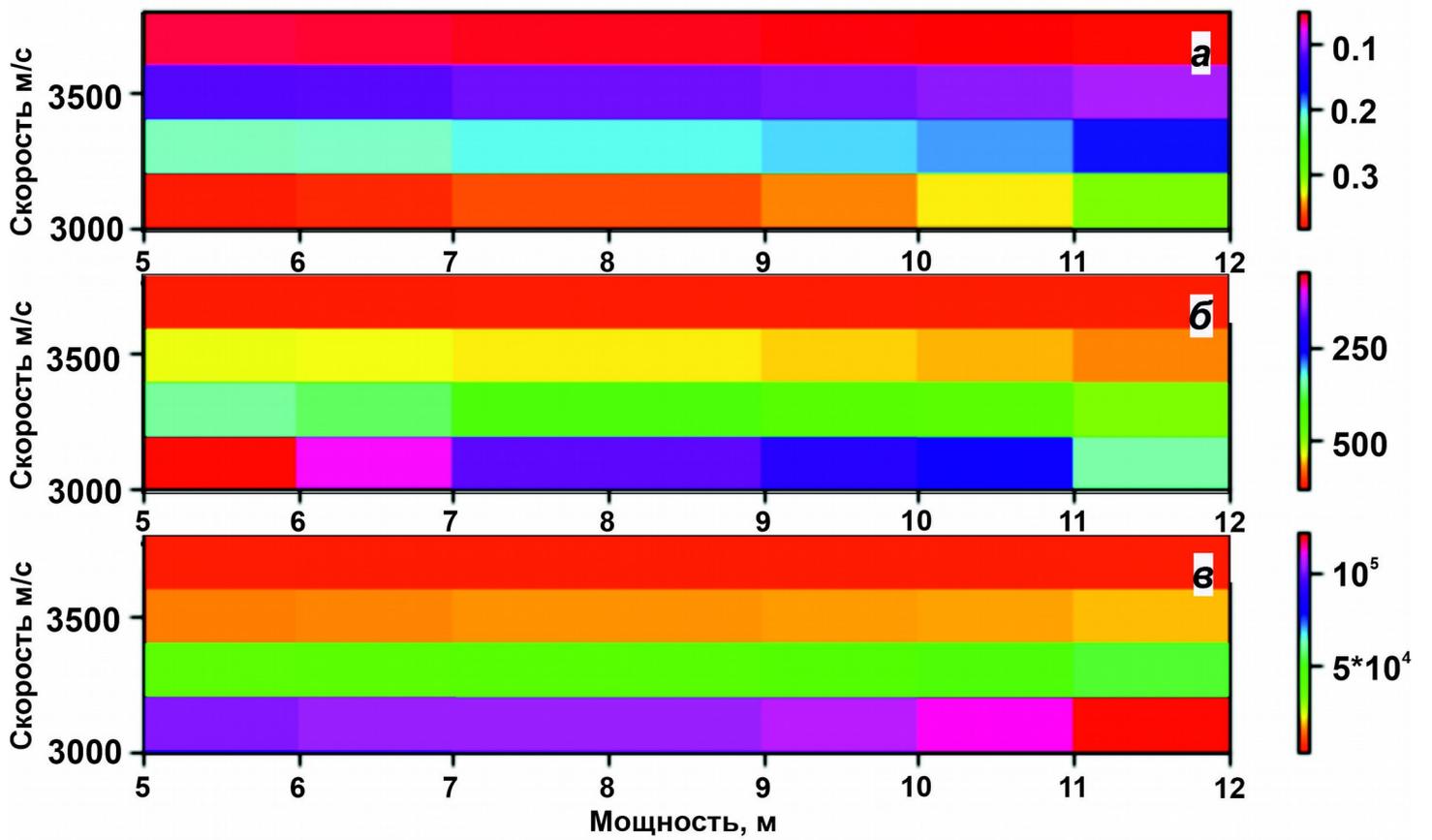
Изменение скорости продольной волны в среде

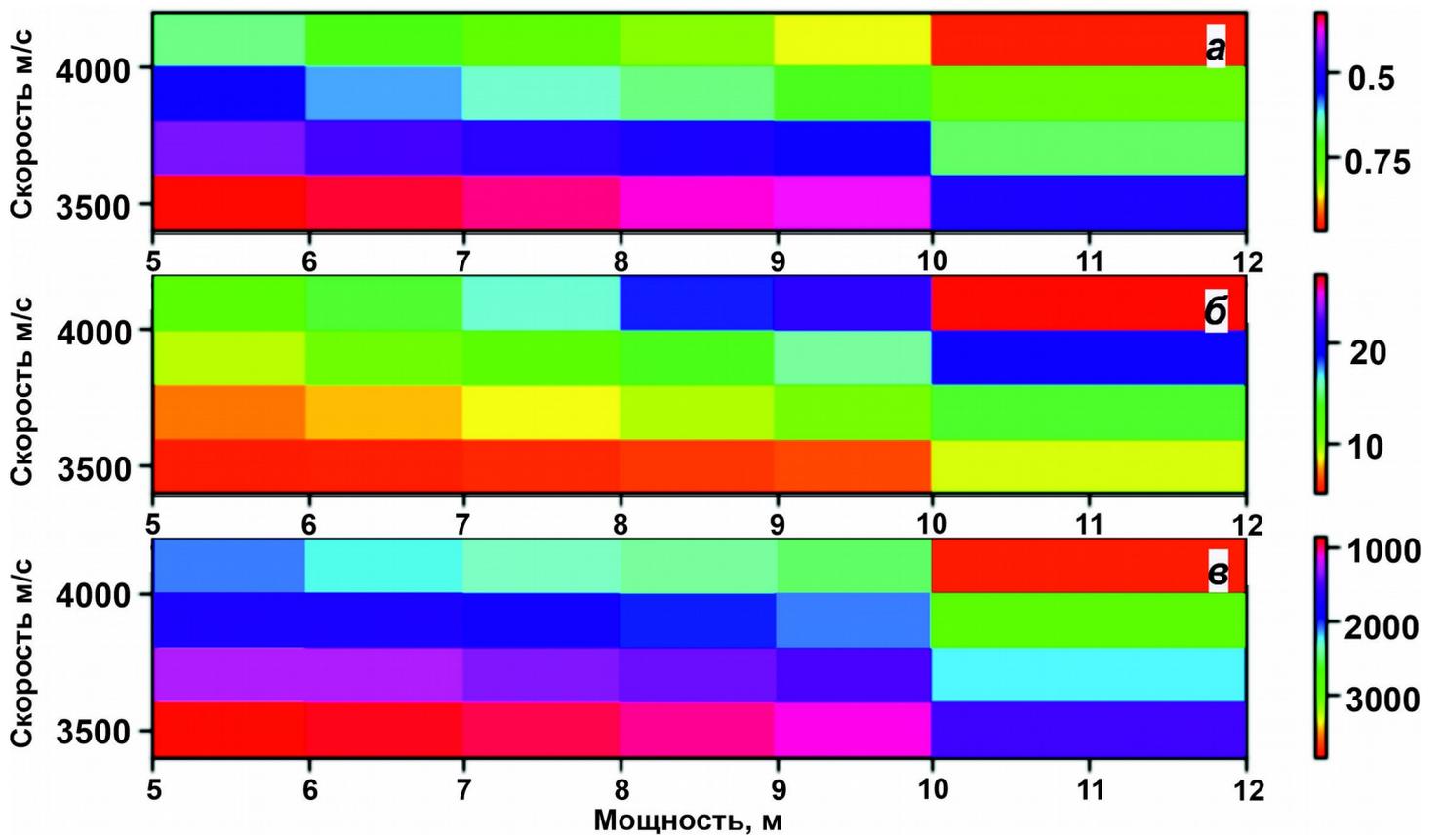
3870 м/с
4000 м/с
3870 м/с

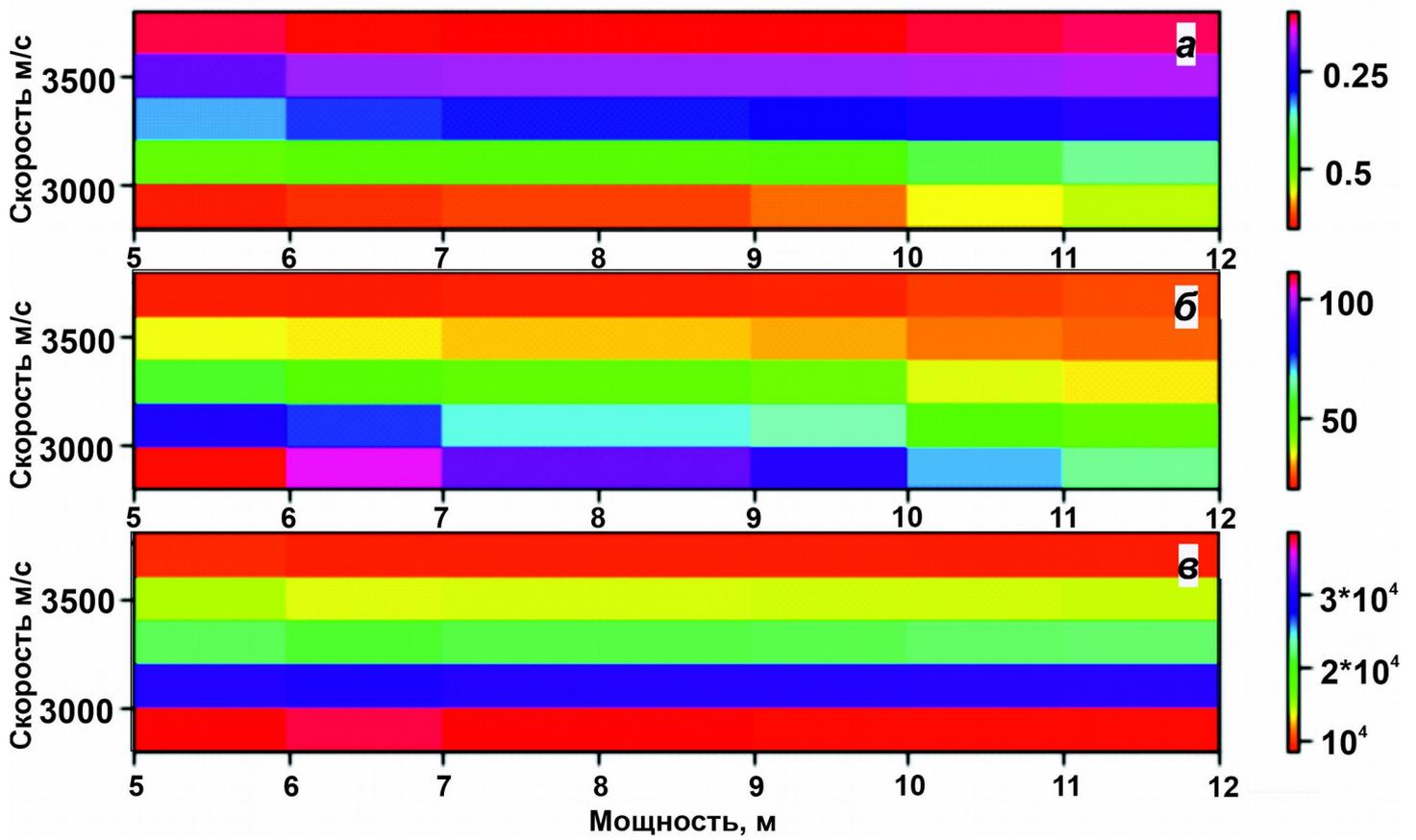


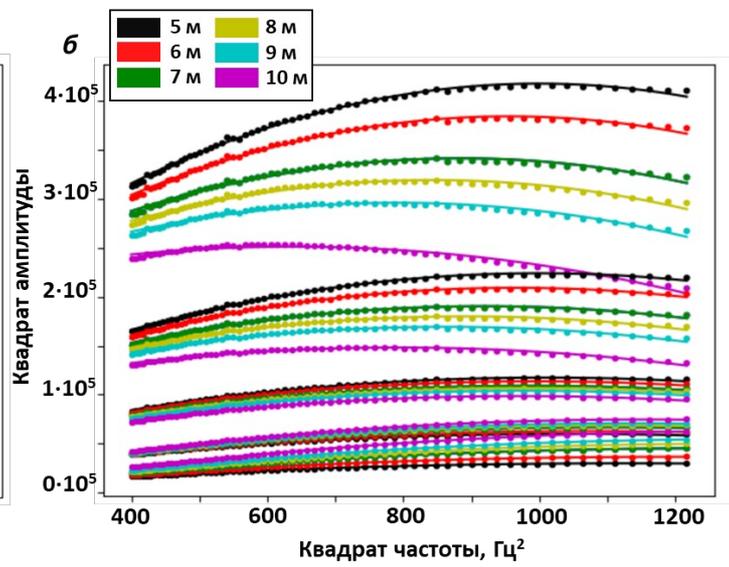
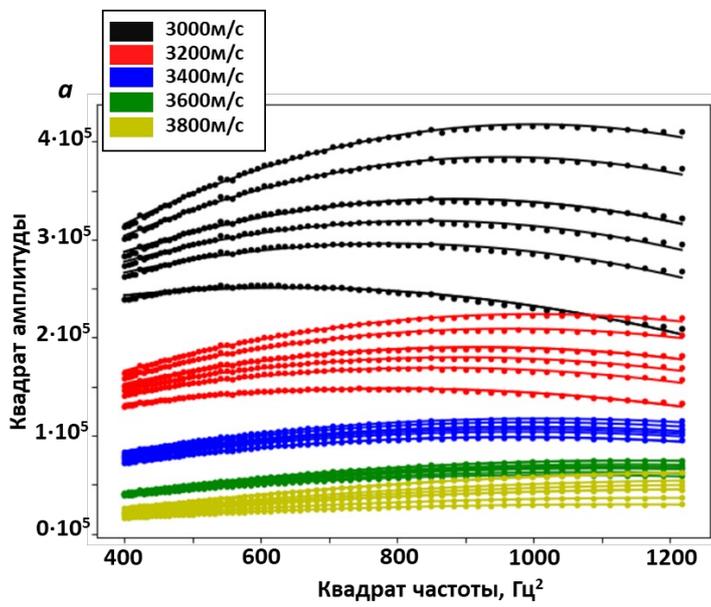
3870 м/с	Изменение скорости продольной волны в среде
4000 м/с	
4130 м/с	

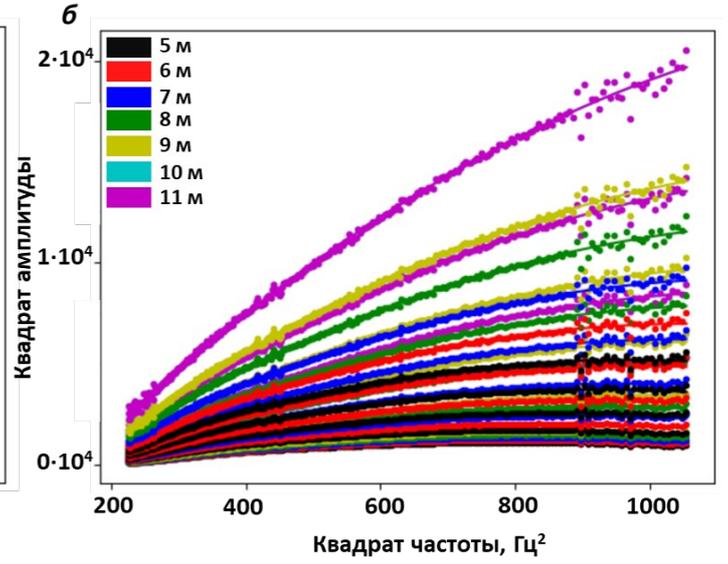
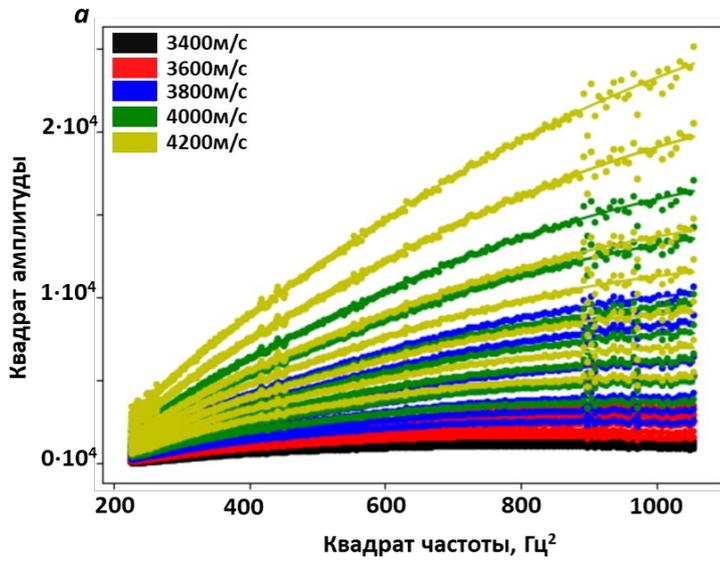


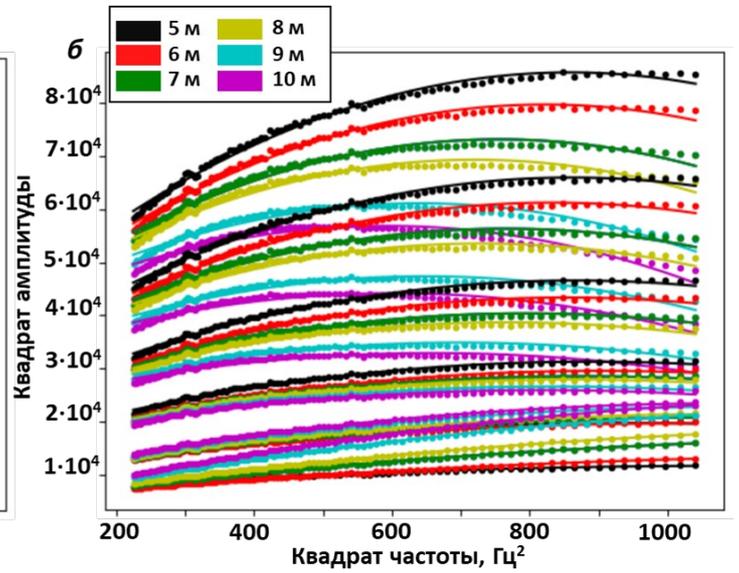
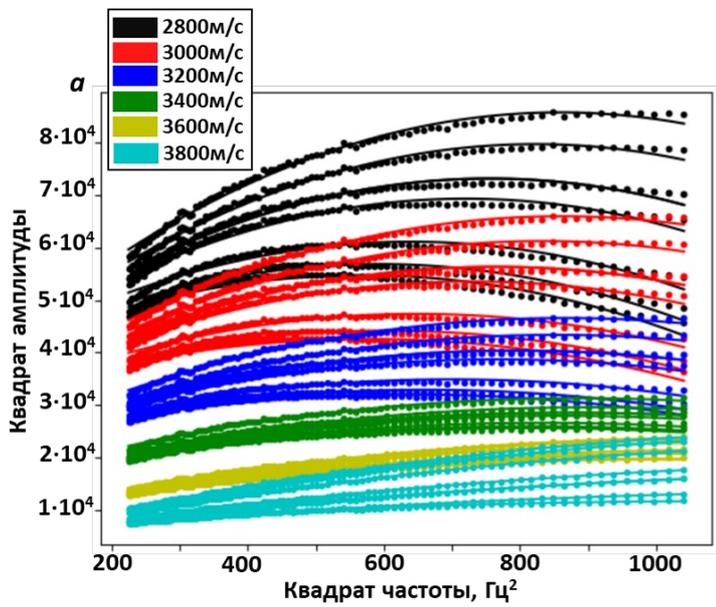




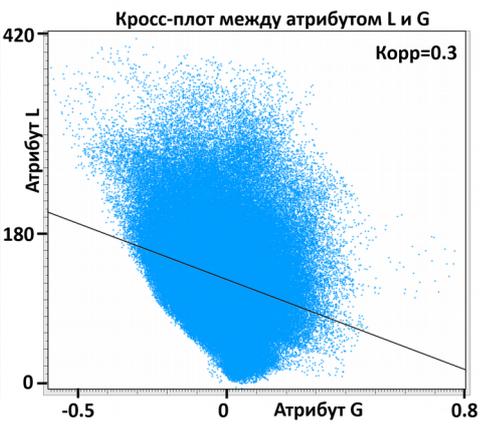
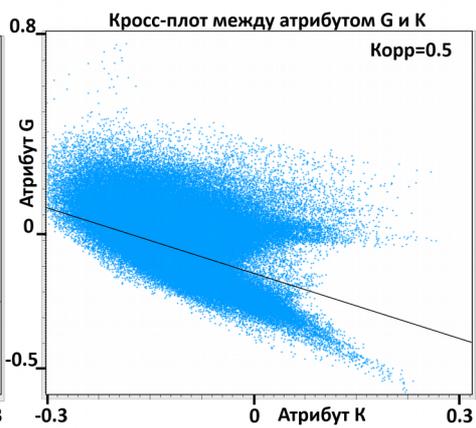
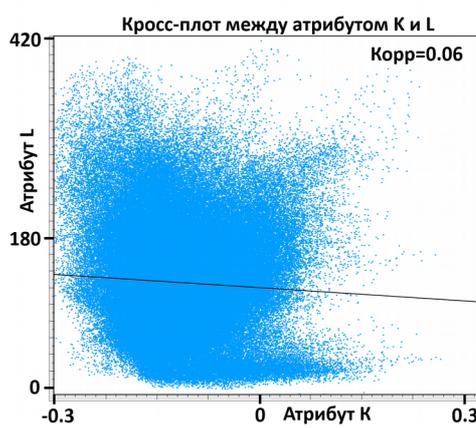




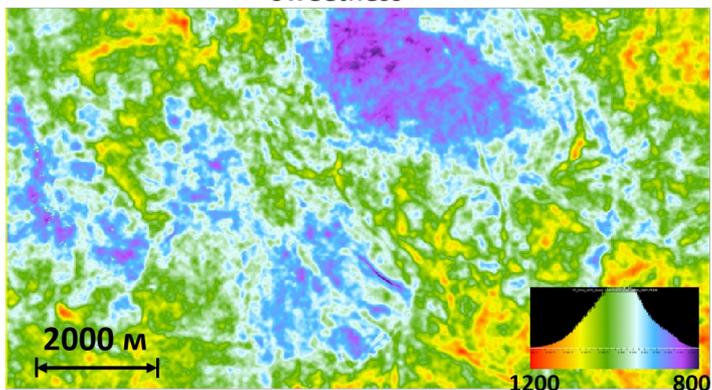




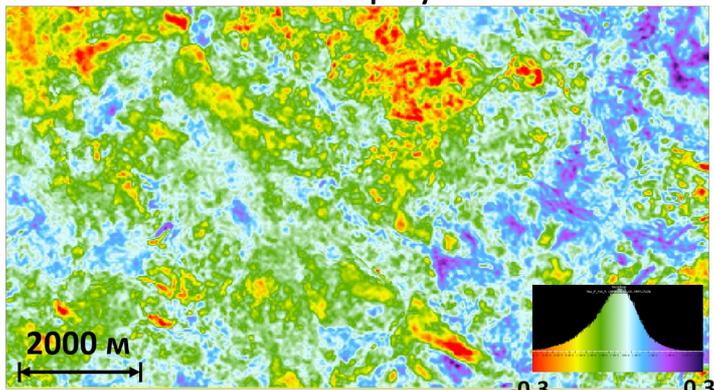




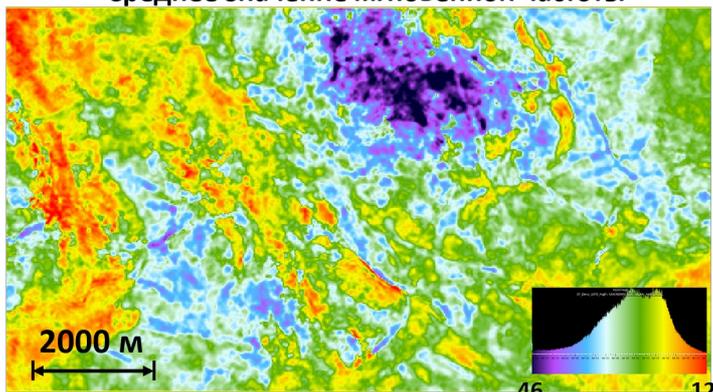
Sweetness



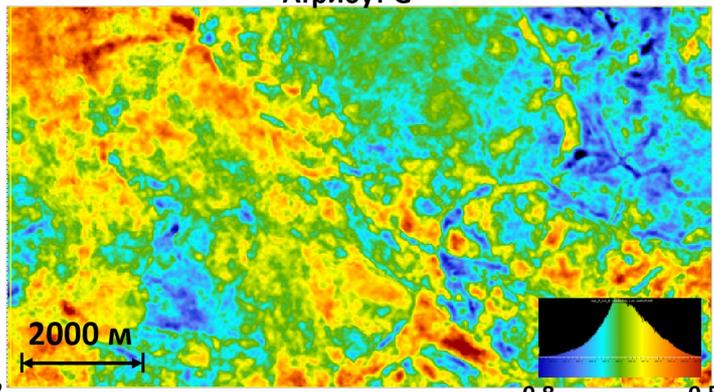
Атрибут К



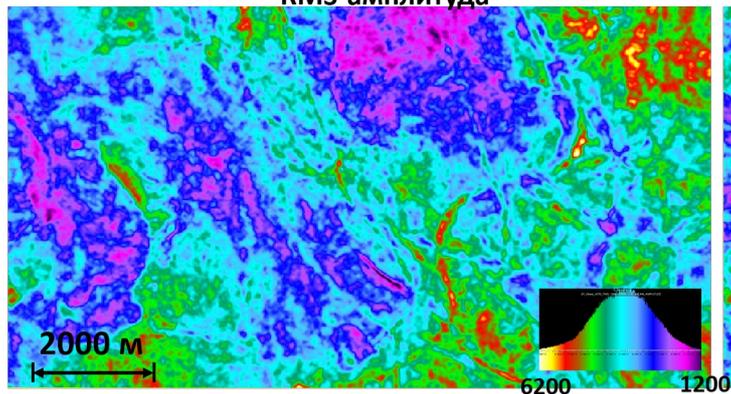
Среднее значение мгновенной частоты



Атрибут G



RMS-амплитуда



Атрибут L

