

ПРОГНОЗ УПРУГИХ СВОЙСТВ МАЛОМОЩНЫХ ОДНОРОДНЫХ ПЛАСТОВ ПО СЕЙСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

П.А. Алексеева^{1,2}, И.Н. Керусов²

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119234, Москва, Ленинские горы, 1, Россия

² ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», 109028, Москва, Покровский бульвар, 3, Россия

В основе многих атрибутов и инверсионных преобразований, решающих задачу извлечения информации об упругих характеристиках среды, лежит уравнение Зоепприца 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 слоев 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 слоев 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 слоев в межскважинном пространстве. Ярким примером маломощных относительно однородных слоев являются тонкие русла. Определение свойств пород, заполняющих русловые объекты, способствует выявлению более песчаных участков, которые перспективны для дальнейшей разработки месторождения.

Спектральная декомпозиция, маломощный слой, среднеюрские отложения

PREDICTION FOR THE ELASTIC PROPERTIES OF THIN HOMOGENEOUS LAYERS, BASED ON SEISMIC DATA

P.A. Alekseeva, I.N. Kerusov

Many attributes and inversion transformations solving the problem of extracting information on the elastic properties of a medium are based on the Zoeppritz equation or its approximations calculated for a boundary between two half-spaces. In a real medium, a seismic signal is in interference as a result of reflection from the top and bottom of individual thin layers or units whose elastic properties differ from those of the adjacent rocks. In such media, there is a discrepancy between experimental and theoretical dependences of the reflection coefficient amplitude developed for half-spaces. For a homogeneous thin layer, the change in the frequency response of the reflection coefficient is associated with the reflection coefficients of the layer top and bottom interfaces and the wave traveltime within the layer at the same time. A detailed analysis of the reflection coefficient amplitude of a homogeneous thin layer using the spectral decomposition technology allows us to isolate only the change in the reflection coefficients, regardless of the thickness. The proposed method for predicting the elastic properties of thin layers is based on the analytical derivation of the reflection coefficient of a homogeneous thin layer, according to which there is a parabolic relation between the squared reflection coefficient amplitude and the squared frequency. The approximation coefficient at the zero degree of the argument mainly characterizes the properties of a medium, unlike the first- and second-degree coefficients, which depend both on the properties and on the thickness of the layer. Therefore, it makes sense to use the approximation coefficient at the zero degree of the argument as an attribute of the wavefield to predict the elastic properties of thin layers in the interwell space. A good example of a relatively homogeneous thin layer is a narrow riverbed. Determining the properties of the rock filling the channel feature helps identify more sandy areas promising for further development of the field.

Spectral decomposition, thin layer, Middle Jurassic deposits

ВВЕДЕНИЕ

Прогноз свойств 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) [Федорова и др., 2016]. Основная проблема прогноза свойств маломощных объектов по сейсмическим данным заключается в том, что амплитудно-частотная и фазовая характеристики отражения от однородного слоя или пачки слоев зависят от временной мощности [Partyka, 1999]. Данный эффект ведет к изменению как амплитуды при нормальном падении, так и зависимостей амплитуды от угла падения (AVA-зависимостей) [Hamlyn, 2014], поэтому результаты, полученные по прогнозу упругих параметров на основе *AVA*-инверсии, не всегда отображают истинные упругие свойства внутри маломощных объектов [Wapenaar, 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 [Widess, 1973; Chung, 1994]. Согласно полученной аппроксимации, квадрат амплитуды коэффициента отражения параболически зависит от квадрата частоты. Коэффициент аппроксимации K 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 расчета амплитуд на разных частотах применялась спектральная декомпозиция на основе вейвлет-преобразования. Результаты показали, что влияние мощности на атрибут K 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 межскважинном пространстве.

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-озерными [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 собой 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 [Widess, 1973; Chung, 1994], 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:

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

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, коэффициенты K , G , L выражаются как:

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

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

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

где t_h — одинарное время пробега в слое.

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 расчета аппроксимации отражения от маломощного слоя при падении волны под углом необходим учет образования обменных волн. Как показано в работе [Luo et al., 2018], амплитуда обменных волн может быть достаточно высокой.

В связи с этим для корректного анализа изменения амплитуды необходим учет четырех отражений, находящихся в интерференции: PP , $PPPP$, $PSPP$, $PPSP$. Отражение $PSPP$ является малоамплитудным по сравнению с вышеописанными отражениями. Отражения $PSPP$ и $PPSP$ регистрируются одновременно, поэтому итоговых отражений три. 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 трех отражений при малой мощности пласта по сравнению с длиной волны. Таким образом, коэффициент отражения выражается следующей формулой:

$$R(t) = r_1 \cos \left\{ \left(t - \frac{h}{v_{P_2}} \right) \frac{2\pi}{T} \right\} + r_2 \cos \left\{ \left(t + \frac{h}{v_{P_2}} \right) \frac{2\pi}{T} \right\} + r_3 \cos \left\{ \left(t + \frac{h}{v_{S_2}} \right) \frac{2\pi}{T} \right\}, \quad (6)$$

где r_1 , r_2 , r_3 характеризуют коэффициенты отражения PP , $PPPP$ и совместно $PSPP$ и $PPSP$ волн соответственно, v_{P_2} , v_{S_2} — скорости продольной и поперечной волн во втором слое, T — период волны.

При условии малой мощности относительно длины волны верно следующее допущение:

$$\cos \left(\frac{\omega h}{v_{P_2}} \right) = 1 - 2 \sin^2 \left(\frac{\omega h}{2v_{P_2}} \right) \approx 1 - 2 \left(\frac{\omega h}{2v_{P_2}} \right)^2. \quad (7)$$

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

$$R(t) = \cos(\omega t) \left\{ r_1 \left(1 - 2 \left(\frac{h\pi}{v_{P_2} T} \right)^2 \right) + r_2 \left(1 - 2 \left(\frac{h\pi}{v_{P_2} T} \right)^2 \right) + r_3 \left(1 - 2 \left(\frac{h\pi}{v_{S_2} T} \right)^2 \right) \right\} + \sin(\omega t) \left\{ r_1 \frac{2h\pi}{v_{P_2} T} - r_2 \frac{2h\pi}{v_{P_2} T} - r_3 \frac{2h\pi}{v_{S_2} T} \right\}. \quad (8)$$

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 нас интересует значение аргумента, приуроченное к кровле пласта, то:

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

При подстановке (12) в (8), максимальное значение трассы равно

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

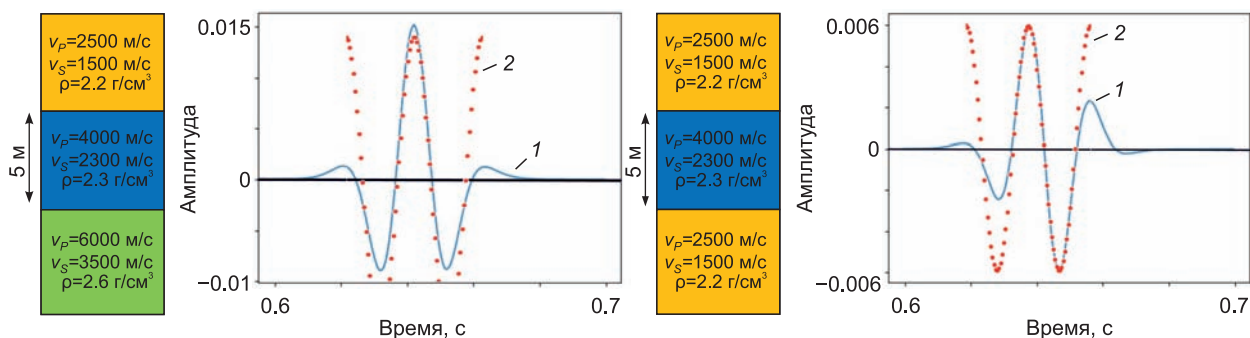


Рис. 1. Сопоставление трассы, рассчитанной полноволновым методом, с трассой, рассчитанной по формуле (8).

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

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

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

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

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 случаев.

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. Видно, что предложенная модель достаточно хорошо аппроксимирует коэффициент отражения.

Для анализа полученных зависимостей на рис. 2 показано изменение максимальной амплитуды трассы в зависимости от частоты и мощности слоя для двух различных моделей в случае нормального падения. Моделирование наблюдаемых данных выполнено с применением полноволнового метода, в качестве источников использовались импульсы Рикера с различной частотой. Наилучшее сходство теоретических и наблюдаемых 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 наблюдаемых абсолютных значений максимальной амплитуды трассы, зависимости, которые иллюстрируют аналитическое решение, отображают основные закономерности, полученные полноволновым методом. 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 Tesserat для слоев с изменяющейся мощностью и свойствами.

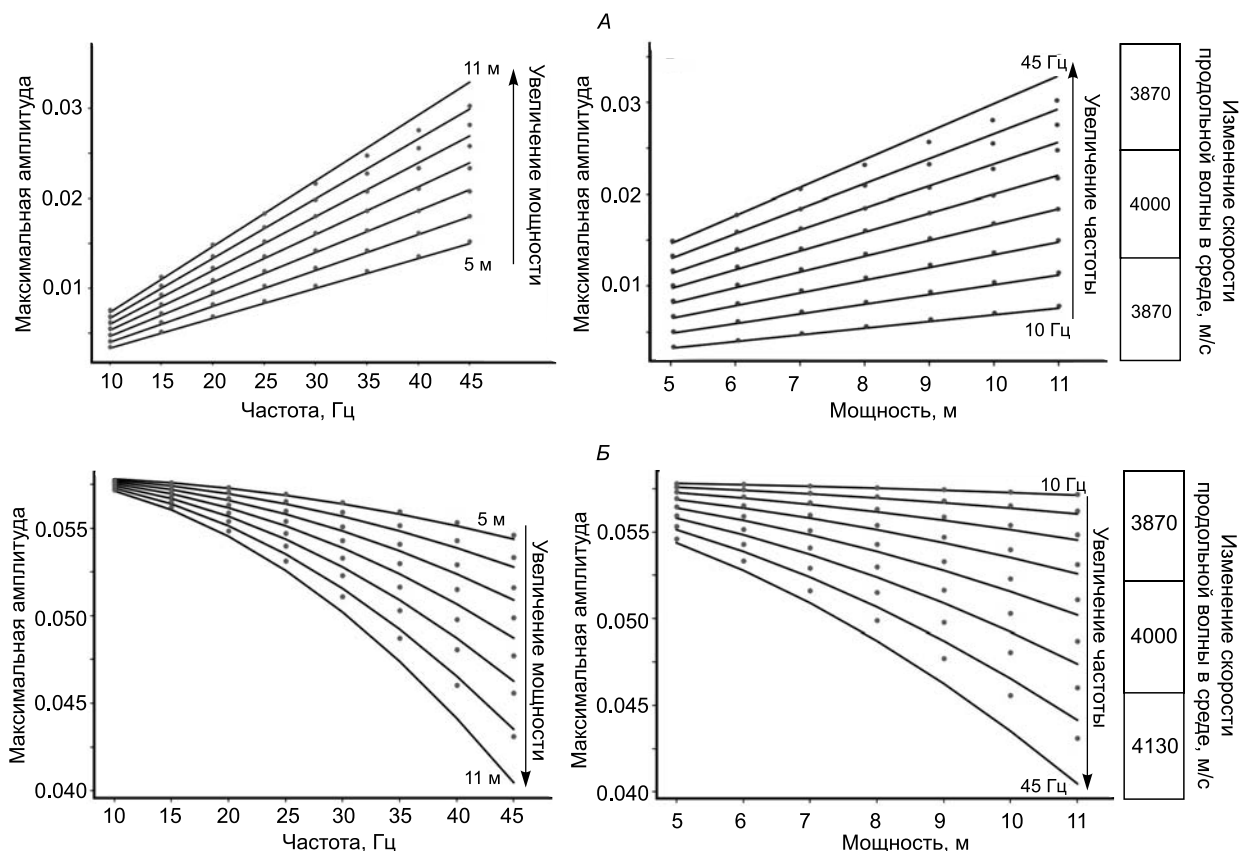


Рис. 2. Сопоставление максимальных амплитуд трасс, построенных полноволновым методом с использованием импульсов Рикера различной частоты (точки), с аппроксимацией максимальной амплитуды (линии) по формуле (14) для модели контрастного слоя (А) и для модели переходного слоя (Б).

Согласно формуле (14), коэффициент K зависит преимущественно от свойств слоев, в отличие от коэффициентов G и L . Поэтому для проверки выведенной формулы будет рассмотрено, как изменяются атрибуты коэффициента отражения от трехслойной модели среды с изменяющейся мощностью 2-го слоя и скоростью 1-го (модель 1), 2-го (модель 2) и 3-го (модель 3) слоев. Параметры моделей представлены в табл. 1. При моделировании использовался широкополосный импульс с полезной частотой от 10 до 40 Гц с добавлением шумовой составляющей (5 %), импульс показан на рис. 3.

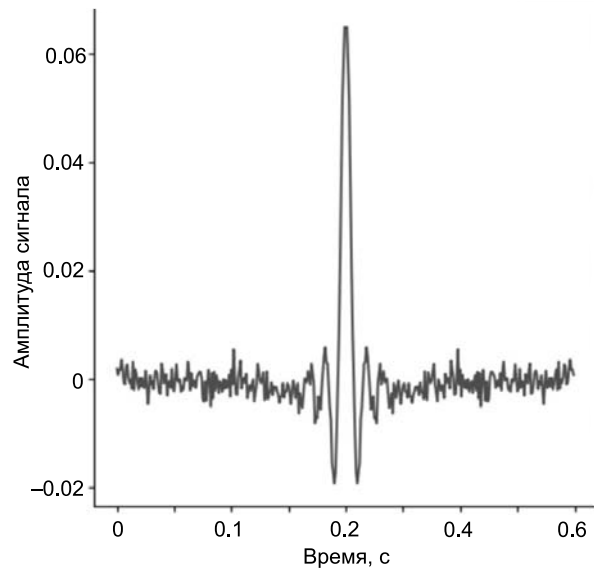
Таблица 1. Параметры моделей 1—3

Слой	v_s , м/с	v_p , м/с	Плотность, доли ед.
Модель 1			
1	2250	3200—3800	2.2
2	2300	3500	2.1
3	2550	4400	2.4
Модель 2			
1	2200	3000	2.1
2	2300	3400—4200	2.32
3	2230	3200	2.1
Модель 3			
1	2550	4400	2.4
2	2300	3500	2.1
3	2350	2800—4000	2.2

По результатам моделирования построены карты атрибутов K , G и L в зависимости от свойств среды и мощности 2-го слоя (рис. 4). Для расчета 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 .

Рис. 3. Широкополосный импульс с шумовой составляющей 5 %.



По анализу полученных карт, изменение атрибута K для моделей 1 и 3 характеризует преимущественно изменение скоростей в области слабого пласта (до 12 м), 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. 5) для рассчитанных моделей, выбранная зависимость хорошо аппроксимирует наблюдаемые значения. Кроме того, на каждом графике происходит группирование аппроксимирующих парабол соответственно изменению 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 этим 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 менее 12 м, что составляет менее 1/8 длины волны.

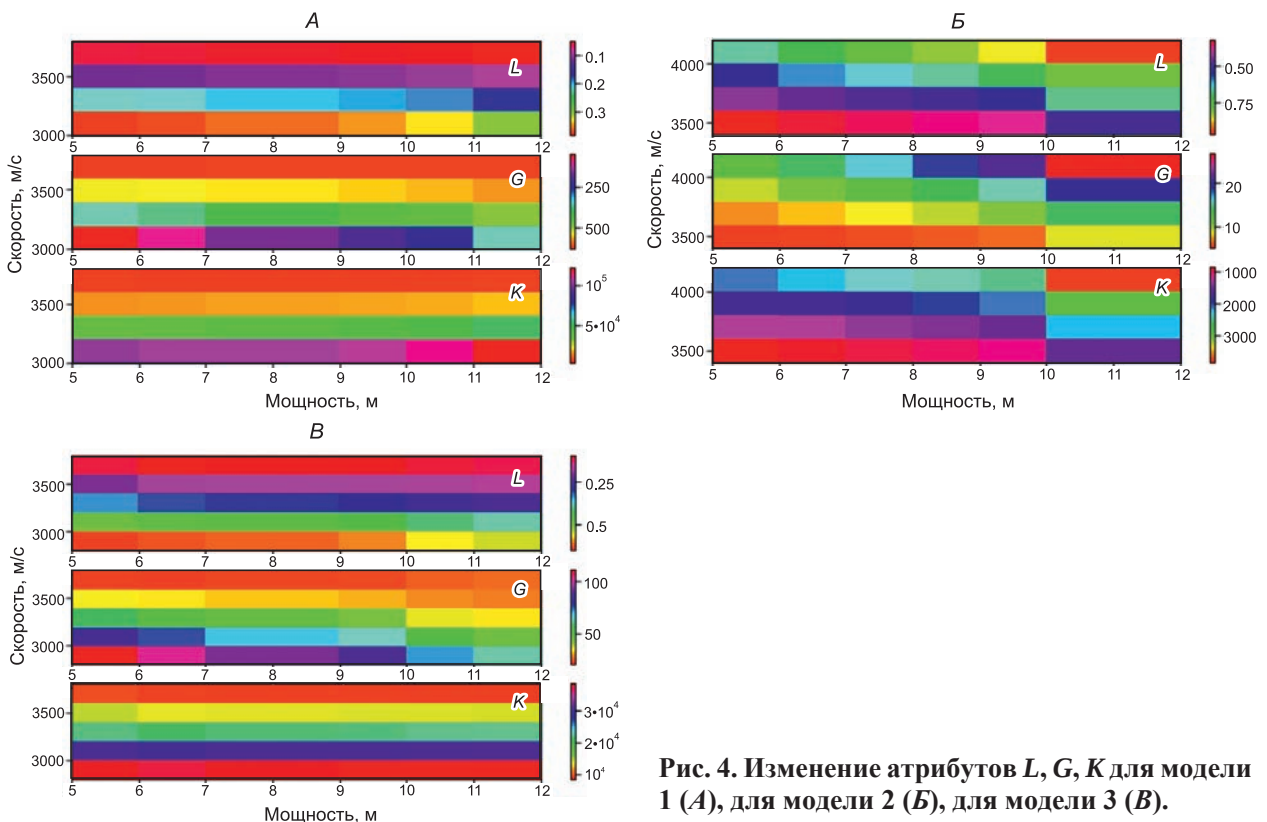


Рис. 4. Изменение атрибутов L , G , K для модели 1 (А), для модели 2 (Б), для модели 3 (В).

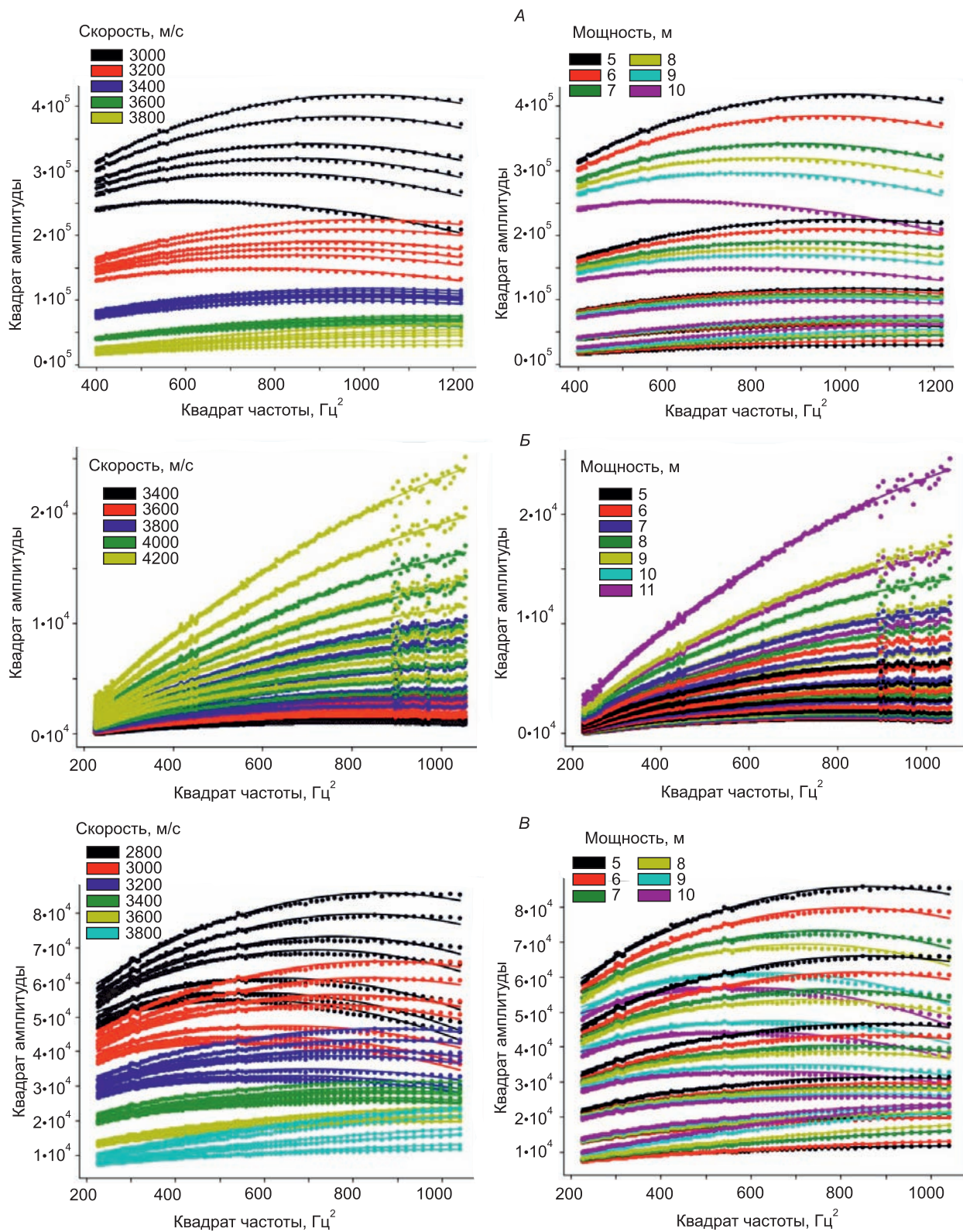


Рис. 5. Графики зависимостей квадрата амплитуды от квадрата частоты для модели 1 (А), для модели 2 (Б), для модели 3 (В).

ПРИМЕНЕНИЕ

Для применения вышеописанного метода использовались сейсмические данные 3D, участок работ расположен в Западно-Сибирской нефтегазонасыщенной провинции. Целевым интервалом исследования на данном участке являются среднеюрские (тюменская свита) аллювиально-озерные отложения. Интерес к данным отложениям вызван тем, что они нефтеносны и относятся к ТриЗам, поэтому 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-озерные, 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 [Rizzetto, Tosi, 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 ЮК_{2,3} (верхняя подсвита тюменской свиты), так как влияние отражения от кровли триасовых отложений не столь значительно по сравнению с нижележащими аллювиально-озерными отложениями. Кроме того, данный интервал, согласно скважинным данным, характеризуется высокой латеральной и вертикальной неоднородностью и маломощными отложениями, связанными с речными системами, озерами 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 определенной частоты (красного, зеленого или синего оттенков) (рис. 6). Одним из факторов, влияющих 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.

Для прогноза свойств были проанализированы атрибуты K , G , L , описанные в предыдущей главе. Для их расчета выполнена спектральная декомпозиция с использованием непрерывного вейвлет-преобразования с комплексным вейвлетом Морле; диапазон частот, который применяли 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. 7), 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. 8). Для сопоставления были рассчитаны атрибуты мгновенной частоты, RMS-амплитуды и *sweetness*. В таблице 2 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 ин-



Рис. 6. RGB-смешивание частот частично угловых сумм.

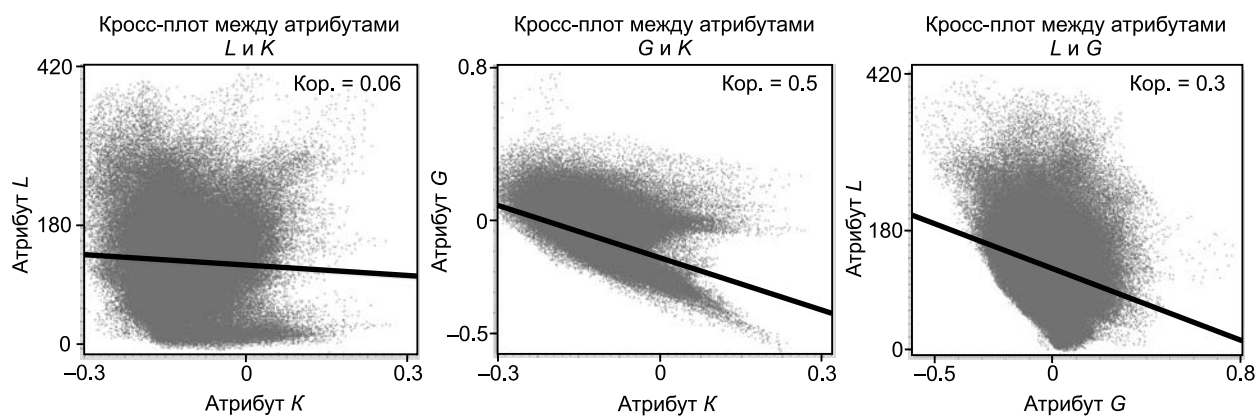


Рис. 7. Анализ взаимной корреляции атрибутов K, G, L.

Линия — тренд аппроксимации взаимной корреляции атрибутов.

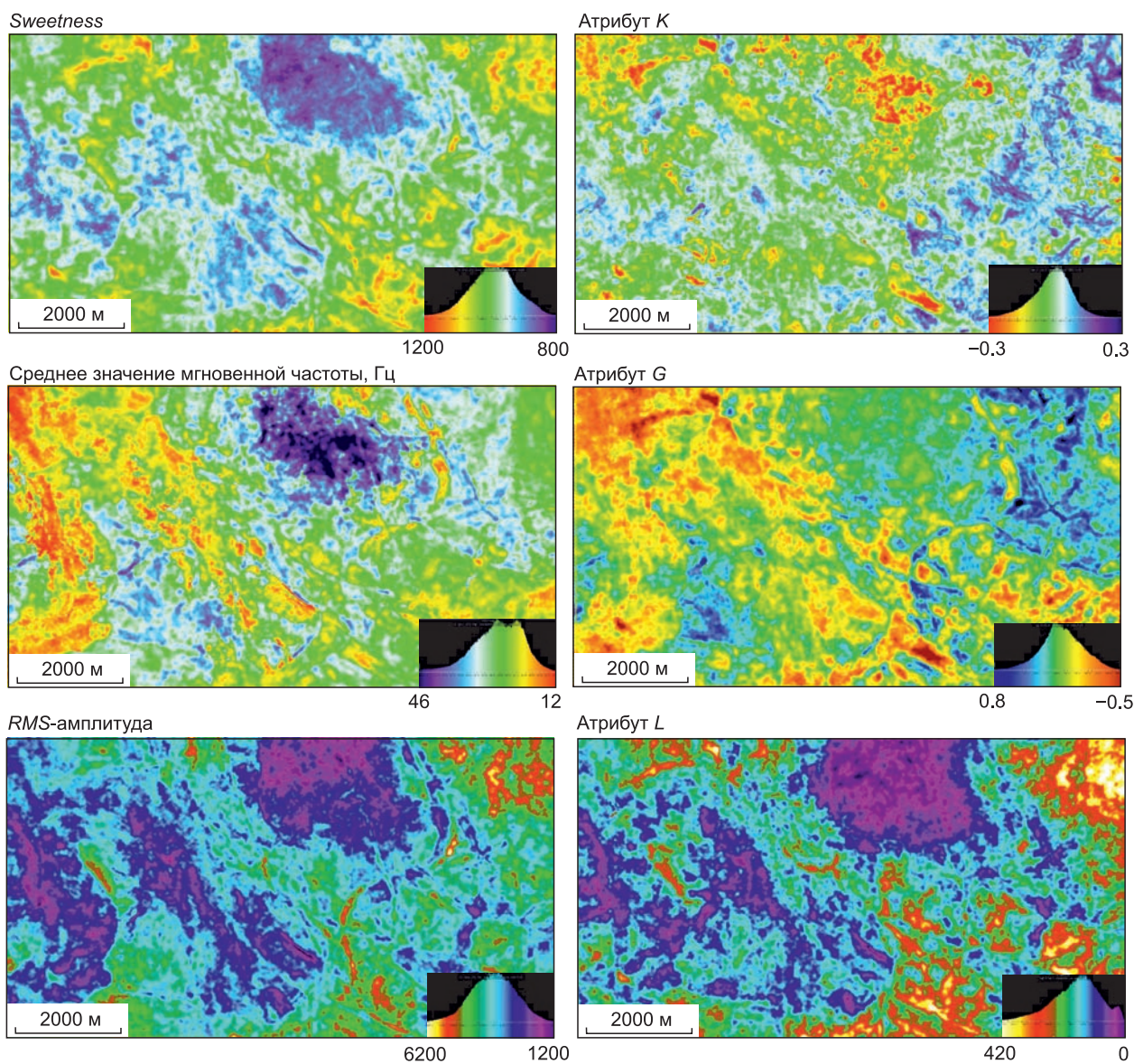


Рис. 8. Атрибуты волнового поля в интервале отложений ЮК₂₋₃.

Таблица 2.

Коэффициенты корреляции атрибутов волнового поля

Атрибут	<i>Sweetness</i>	RMS-амплитуда	Среднее значение мгновенной частоты
<i>K</i>	−0.06	−0.02	−0.13
<i>G</i>	−0.20	0.12	0.67
<i>L</i>	0.90	0.86	−0.3

формации, 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 несет в себе дополнительную информацию о свойствах разреза, как было показано в введенных 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 слоев, 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 разветвленной реки и прирусловые отмели, согласующиеся со скважинными данными (рис. 9). Основными данными для выделения фаций по скважинам являлся гамма-каротаж и результаты описания керна [Жемчугова, 2014]. Методика выделения фациальных зон по каротажным кривым основана на опубликованных материалах [Ежова, Тен, 2013; Жемчугова, 2014]. Вдоль выделенных русел разветвленной 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. 10). 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 проведенному анализу были выделены фациальные зоны с использованием атрибута мгновенной частоты и атрибута AVB [Kelly, 1992]. Повышенные значения атрибута мгновенной частоты характеризуют области широких долин меандрирующих рек (рис. 11), имеющие по скважинным и сейсмическим данным более ранний возраст по сравнению с разветвленными реками. Атрибут AVB способствовал выделению зон с различной конфигурацией пластов [Kelly, 1992; Алексеева, 2021]. Повышенные значения атрибута AVB характеризуют слои с контрастным изменением свойств в кровле

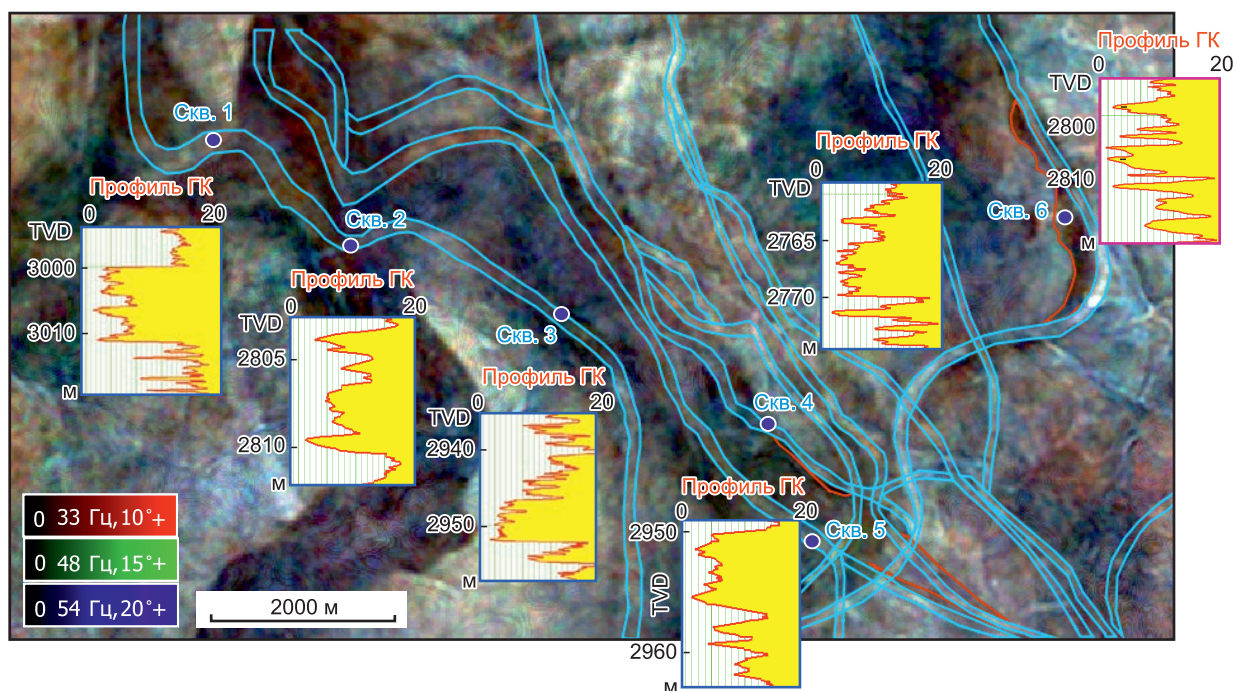


Рис. 9. RGB-смешивание частот частично угловых сумм с вынесенными границами русел разветвленной реки (голубая линия), прирусловой отмели (красная линия) и скважинной информацией.

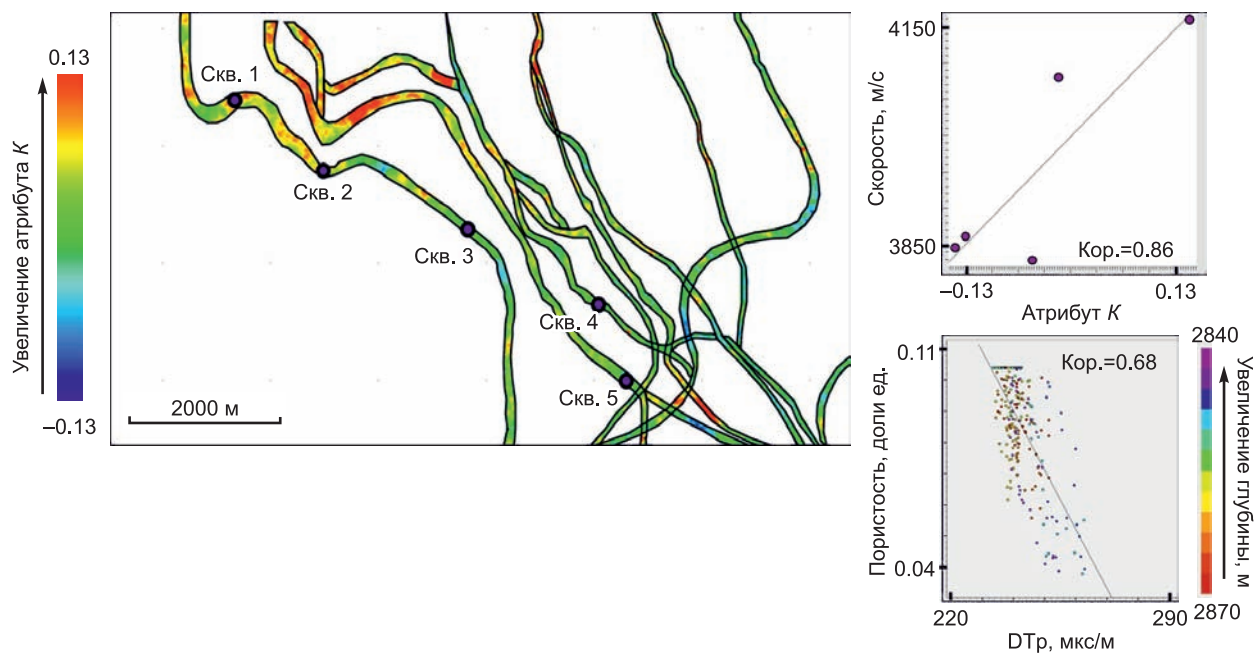


Рис. 10. Распространение атрибута K вдоль русел и его соотношение со скважинными данными.

и постоянным или регрессивным изменением свойств в пласте. По данному атрибуту выделены пойменные участки (рис. 12), 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.

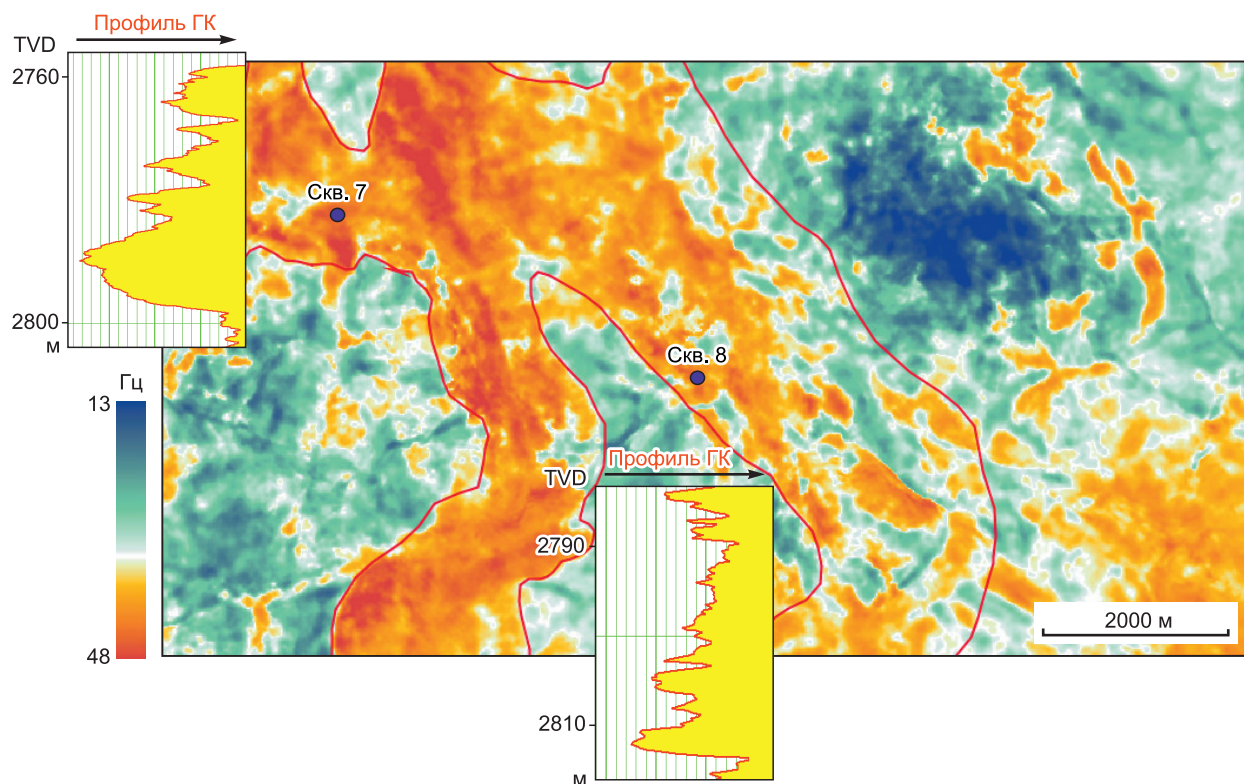


Рис. 11. Атрибут мгновенной частоты с вынесенными границами долин меандрирующих рек и скважинной информацией.

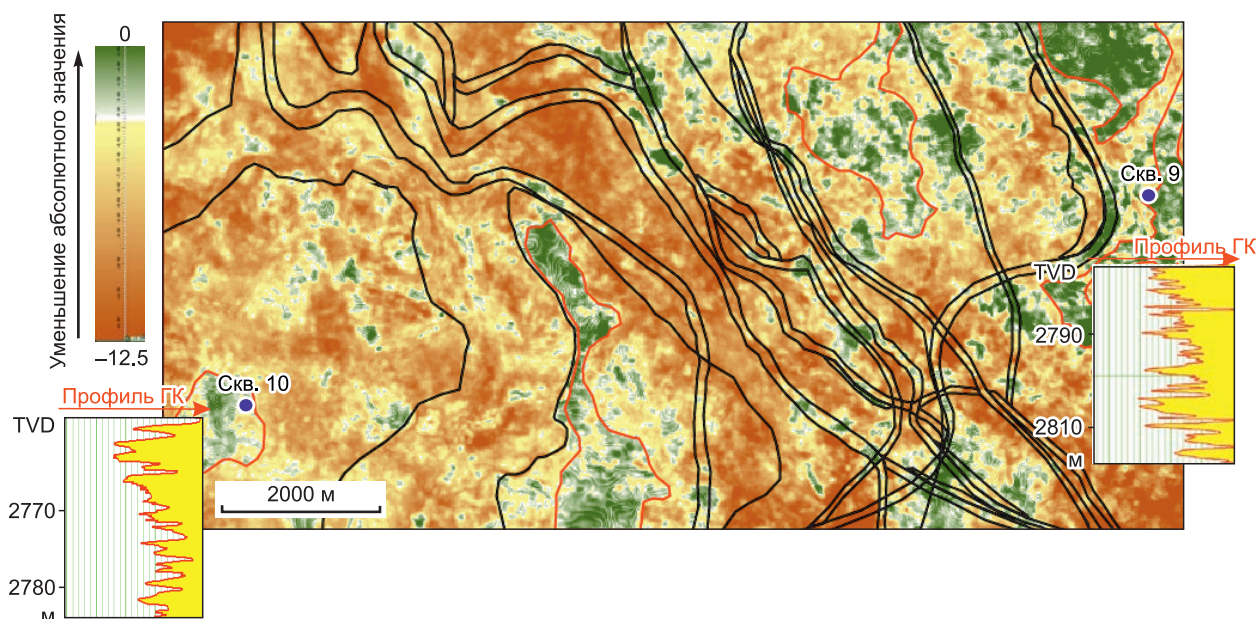


Рис. 12. Атрибут AVB с вынесенными границами временно заливаемых участков пойм (красный), фациальных зон, выделенных по другим атрибутам (черный) и скважинной информацией.

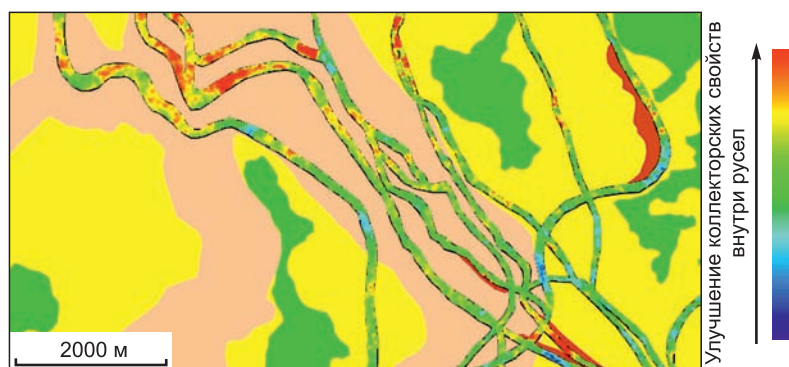
Таким образом, по результатам выполненного атрибутного анализа и на основе скважинной информации была построена фациальная карта, иллюстрирующая временно заливаемые участки пойм, широкие долины меандрирующих рек, более молодые русла разветвленных рек и прирусловые отмели (рис. 13). Использование атрибута 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 слоев, 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 изменение мощности слоя и его 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 преиму-

Рис. 13. Фациальная карта отложений ЮК_{2,3} с выделенными областями временно заливаемых участков пойм (зеленый), пойменных отложений (желтый), широких долин меандрирующих рек (бежевый) и прирусловых отмелей (коричневый).



щественно от свойств пласта и не зависит от мощности, в отличие от коэффициентов при первой и второй степени. Данные теоретические предположения 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.

ЛИТЕРАТУРА

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, Изд-во Томск. политех. ун-та, 2013, 122 с.

Жемчугова В.А. Практическое применение резервуарной седиментологии при моделировании углеводородных систем. М., РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2014, 297 с.

Конторович А.Э., Нестеров И.И., Салманов Ф.К., Сурков В.С., Трофимук А.А., Эрвье Ю.Г. Геология нефти и газа Западной Сибири. М., Недра, 1975, 680 с.

Федорова М., Кирзелева О., Катаев О., Ананьева Е., Осипова Ю. Тюменская свита. Методология создания концептуальных моделей // Нефть и газ, 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, 282 p.

Hamlyn W. Thin beds, tuning, and AVO // The Leading Edge, 2014, v. 33 (12), p. 1394—1396.

Kelly M. Method of geophysical exploration. Patent 5136552, US, 1992, 5 p.

Luo C., Li X., Huang G. Joint PP and PS AVA waveform inversion using propagator matrix forward modeling // SEG 88th annual meeting, 2018, p. 595—599.

Partyka G. Interpretation application of spectral decomposition in reservoir characterization // The Leading Edge, 1999, v. 18 (3), p. 353—360.

Rizzetto F., Tosi L. Rapid response of tidal channel networks to sea-level variations // Global Planet. Change, 2012, v. 92—93, p. 191—197.

Wapenaar K., Wijngaarden A., Geloven W., Lrij T. Apparent AVA effects of fine layering // Geophysics, 1999, v. 64 (6), p. 1939—1948.

Widess M.B. How thin is a thin bed // Geophysics, 1973, v. 38 (6), p. 1176—1180.

*Поступила в редакцию 10 июня 2021 г.,
принята в печать 2 апреля 2022 г.*