

DOI: <https://doi.org/10.25689/NP.2025.3.11-28>

EDN BNPГJK

УДК 550.834

**Опыт применения регуляризации 5D в азимутальной  
обработке сейсморазведочных данных для опробования  
технологии азимутальной инверсии AVAz, с целью оценки  
возможности выделения зон распространения трещиноватого  
коллектора в интервале баженовско-абалакского комплекса**

*Правдухин А.П., Шахов А.В.*

*ООО «Тюменский нефтяной научный центр», ПАО «НК Роснефть», Тюмень, Россия*

**Experience of 5D regularization application in azimuthal  
processing of seismic data for azimuthal inversion AVAz testing  
for estimation of fractural reservoir spread areas  
in Bazen-abalaksy deposits interval**

*A.P. Pravdukhin, A.V. Shakhov*

*Tyumen Petroleum Research Center LLC, "NC Rosneft", Tyumen, Russia*

**E-mail: [appravdukhin@tnnc.rosneft.ru](mailto:appravdukhin@tnnc.rosneft.ru)**

**Аннотация.** Многие алгоритмы обработки данных сейсморазведки накладывают свои требования на пространственное распределение входных данных. Самый известный пример это требование регулярности входных данных для процедур миграции. Для приведения в соответствие пространственного распределения входных данных с требованиями процедур обработки или интерпретации применяются алгоритмы 3D регуляризации, а также многомерные алгоритмы, получившие название 5D регуляризации. Главное преимущество многомерных алгоритмов 5D регуляризации это способность обрабатывать несколько пространственных измерений распределения данных одновременно и использовать пространственные измерения с хорошим заполнением данных для интерполяции отсутствующих значений на других пространственных измерениях. В настоящей статье рассматривается применение 5D регуляризации для подготовки данных для азимутальной сейсмической инверсии. Рассмотрены два подхода к определению

геометрии выходных данных регуляризации. Представлены результаты азимутальной инверсии и результаты оценки параметров НТИ-анизотропии на основе результатов азимутальной инверсии.

**Ключевые слова:** 5D Регуляризация, многомерная Фурье реконструкция, азимутальная обработка, азимутальная сейсмическая инверсия AVAz, P-импеданс, S-импеданс, НТИ-анизотропия, «быстрая» скорость, «медленная» скорость, продольная волна, поперечная волна

**Для цитирования:** Правдухин А.П., Шахов А.В. Опыт применения регуляризации 5D в азимутальной обработке сейсморазведочных данных для опробования технологии азимутальной инверсии AVAz, с целью оценки возможности выделения зон распространения трещиноватого коллектора в интервале баженовско-абалакского комплекса // Нефтяная провинция.-2025.-№3(43).-С. 11-28. - DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2025.3.11-28>. - EDN BNPJJK

**Abstract.** Many seismic data processing algorithms have strict requirements for input data spatial distribution. The most known example of such kind of requirements is regular space distribution of input data for migration. To adjust data in term of space distribution for specific processing or interpretation procedure, different regularization-interpolation algorithms are used. There are two main classes of 3D seismic data regularization algorithms, traditional 3D approaches and multidimensional algorithms, commonly named as “5D regularization”. In this paper we, have considered the case of 5D regularization application in sequence of data preparation for azimuthal seismic inversion. We show that, to prepare input data for azimuthal seismic inversion, different 5D regularization parameters definition could be, in this paper we consider two possible options. We propose 5D regularization parameters and dimension definitions, that allow prepare data, better to meet requirements of azimuthal inversion. We show results of azimuthal inversion and exhibition HTI anisotropy estimation.

**Key words:** 5D regularization, multidimensional Fourier reconstruction, azimuthal processing, azimuthal seismic inversion AVAz, P-impedance, S-impedance, HTI-anisotropy, “fast” velocity, “slow” velocity, compressional wave, shear wave

**For citation:** A.P. Pravdukhin, A.V. Shakhov Opit primeneniya regularizatsii 5D v azimutalnoy obrabotke seismotazvedochnih dannih dlia opirobovaniya tehnologii azimutalnoy inversii AVAz s tseliu otsenki vozmozhnosti videlenia zon rasprostraneniya treshinovatogo kollektora v intrvale bazenovsko-abalaksckogo kompleksa [Experience of 5D regularization application in azimuthal processing of seismic data for azimuthal inversion AVAz testing for estimation of fractural reservoir spread areas in Bazen-abalakscky deposits interval]. Neftyanaya Provintsiya, No. 3(43), 2025. pp. 11-28. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2025.3.11-28>. EDN BNPJJK (in Russian)

## Введение

Соответствие характеристик пространственного распределения входных данных требованиям применяемого алгоритма обработки или интерпретации является важнейшим условием получения качественного результата. Возможно, самым показательным примером являются условия регулярности пространственного распределения входных данных для миграции. Отклонения от регулярности дискретизации по пространственным измерениям в исходных данных приводят к ухудшению качества миграционного образа вследствие образования миграционных шумов. Не будет большим преувеличением утверждение, что процедуры регуляризации и интерполяции данных сейсморазведки стали стандартно применяться в первую очередь именно для подготовки данных для миграции. Подготовка данных для миграции наиболее характерный, но не единственный пример преобразования сейсмических данных с применением алгоритмов интерполяции и регуляризации для приведения информации в соответствие с требованиями конкретной процедуры обработки. При этом параметры регуляризации, да и выбор самого алгоритма в большой степени зависят от требований процедуры обработки или особенностей решения задачи, для которой готовятся данные. Алгоритмы регуляризации, которые применяются для 3D данных можно условно поделить на традиционные 3D регуляризации и алгоритмы, относящиеся к «многомерным» интерполяциям, которые чаще называют «5D регуляризацией». Алгоритмы 3D регуляризации обычно работают в разных вариантах 3D пространства (в зависимости от выбранных параметров), где в качестве двух направлений пространства используются какие-либо из пространственных характеристик данных (линии, кросслинии, удаление источник-приёмник, азимут, линии ПВ и ПП), а в качестве третьего время или частота. Часто 3D регуляризация выполняется в несколько проходов в разных комбинациях пространственных измерений. В этом случае порядок выполнения расчётов с разными комбинациями пространственных

измерений становится чрезвычайно важен для конечного результата. Данные сейсморазведки 3D имеют пространственное распределение, которое минимально соответствует пяти пространственным измерениям - «линия-кросслиния-удаление азимут-время/частота». Поэтому для задач регуляризации-интерполяции 3D сейсмических данных, там, где требуется обработка с сохранением пространственных характеристик во всех указанных пяти измерениях, лучше подходят алгоритмы, основанные на «многомерной Фурье реконструкции» [2], которые способны одновременно работать с пятью пространственными измерениями сейсмических данных [3]. Процедуры регуляризации, в которых реализованы такие алгоритмы получили общее название «5D регуляризации» Их главное преимущество в том, что используя одновременно большое количество пространственных измерений (больше трёх) они могут использовать направления пространства с хорошим заполнением данными для интерполяции в пространственных измерениях с низким заполнением [1]. Алгоритмы регуляризации этого типа в настоящее время широко применяются в обработке данных сейсморазведки.

### **Практическое применение 5D регуляризации для подготовки данных для азимутальной инверсии AVAz**

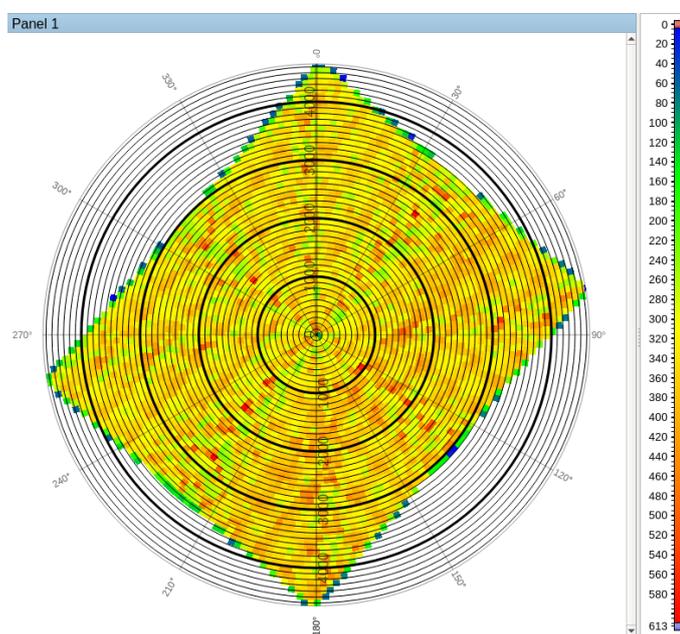
Как уже было отмечено выше, выбор алгоритма и параметров регуляризации в большой степени определяется требованиями задачи, для которой эта регуляризация выполняется. В описываемом здесь проекте стояла задача обработки данных для выполнения азимутальной инверсии. Нужно было выполнить регуляризацию данных и миграцию до суммирования во временной области с сохранением азимутальных характеристик сейсмической информации. В наибольшей степени этим требованиям соответствовало применение регуляризации 5D по набору пяти пространственных измерений «Линия-кросслиния-удаление-азимут-частота» по алгоритму «многомерной

Фурье реконструкции» [2]. Выбор 5D регуляризации в обработке для азимутального анализа обусловлен лучшими характеристиками этого подхода для интерполяции сейсмических данных с учётом азимута. 3D-регуляризация позволяет выполнить аналогичную обработку, но применение её менее технологично, так как требует применения специальных сортировок данных и ограничений при вводе в процедуру 3D регуляризации для предотвращения смешения информации между данными с разных азимутальных направлений. При применении 3D-регуляризации часто требуется несколько итераций для комбинации разных пространственных направлений [1]. Но даже с учётом применения всех отмеченных технологических приёмов для 3D-регуляризации применение 5D регуляризации обеспечивает более высокое качество интерполяции сейсмических данных с учётом вариаций характеристик по азимутам. Поэтому, если в интерпретации стоят задачи работы с сейсмическими данными с учётом азимутальных характеристик, выбор алгоритма регуляризации в обработке за 5D-регуляризацией.

Для основной ветки интерпретации была выполнена обработка с 3D регуляризацией и временной миграцией без сохранения азимутальных характеристик. Поэтому параметры 5D регуляризации и миграции в азимутальной ветке обработки определялись только требованиями задачи азимутальной инверсии. Рассматривалось выполнение 5D регуляризации в одном из двух вариантов параметризации: первый представлял собой версию классического разбиения на «площадки OVT», второй - разбиение на азимутальные сектора. Были выполнены оценки каждого из подходов с точки зрения наилучшего соответствия полученных данных для выполнения основной задачи (азимутальная инверсия).

На изучаемой площади были выполнены сейсморазведочные работы 3D с кратностью 120 и максимальным удалением источник-приёмник 4650 метров. В пределах максимального удаления 2975 метров данные являются «полноазимутальными» (Рис. 1).

Регуляризация сейсмических данных по версии «OVT-плиток» была задана направлениями «линия-кросслиния-удаление-Х, удаление-У», где «удаление-Х, удаление-У» - проекции удаления источник-приёмник на оси координат Х и У, совпадающие с направлениями линий и кросслиний системы наблюдения. Регуляризация по варианту разбиения на азимутальные сектора выполнялась с заданием направлений «линия-кросслиния-удаление-азимут». Для выполнения регуляризации была сделана выборка по удалению источник-приёмник в пределах 3000 метров, в котором исходные данные являлись полноазимутальными и регуляризация в этом диапазоне удалений работает без экстраполяции при всех значениях азимута. 5D интерполяция способна экстраполировать трассы на дальних удалениях в интервалах азимутов, в которых они отсутствовали ввиду ограничений системы регистрации, но для решения задачи использовались данные, полученные без применения экстраполяции.



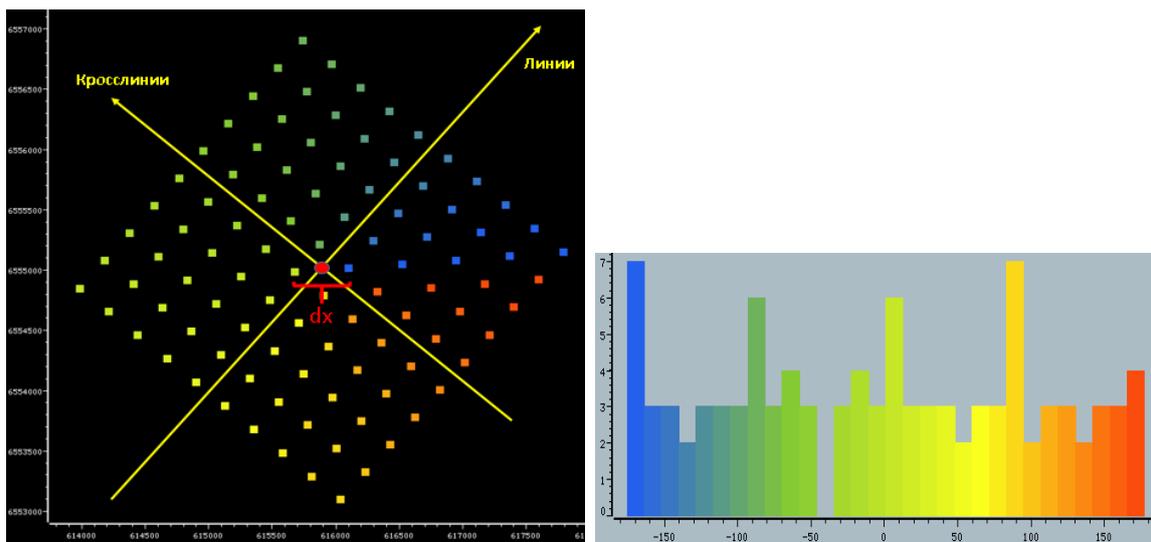
**Рис. 1.** «Роза-диаграмма» исходных данных до регуляризации.

**Цветовая шкала показывает общее количество трасс, попадающих в класс «удаление-азимут» на участке расчёта. Согласно геометрии системы регистрации максимальное удаление вдоль линии приёма составляло 3575 метров, вдоль линии взрыва 2975 метров. Данные являются «полноазимутальными» в пределах максимального удаления 2975 метров**

Два варианта регуляризации, отличающиеся выбором направлений пространства для работы алгоритма, создают разное распределение данных по направлениям удаления и азимута. Регуляризация по площадкам общего азимута и удаления создаёт в результате распределение данных близкое к исходному. Для выполнения азимутальной инверсии это распределение данных по пространству имеет серьёзный недостаток, который заключается в очень разной плотности данных в интервалах ближних, средних и дальних удалений. При определении стандартного размера «площадки общего удаления и азимута», то есть в два интервала между линиями пунктов взрыва и пунктов приёма, данные, полученные в результате регуляризации имеют очень редкое распределение в интервале ближних и средних удалений по азимутальным направлениям для выполнения азимутальной инверсии. На исследуемой площади расчёт с такими параметрами привёл к результату с равномерным распределением данных по азимутам при углах падения от шестнадцати и более градусов на целевом интервале (баженовско-абалакский комплекс). Этот недостаток в некоторой степени исправляется, если при регуляризации уменьшить параметр размера площадки общего удаления и азимута, использовать нестандартный размер. Плотность трасс в ближних удалениях в этом случае повышается за счёт интерполяции. Но тогда общая кратность результирующих данных резко повышается, количество интерполированных данных становится недопустимо высоким и затраты на выполнение миграции по таким данным также неоправданно повышаются.

Для данных на исследуемой площади интервал между линиями приёма и линиями взрыва был одинаков и составлял 300 метров. Соответственно размер OVT площадки при стандартной параметризации составляет 600x600 метров. При таком размере OVT площадки, минимальное удаление после регуляризации становится 425 метров (2 пары ПВ-ПП на весь

диапазон азимутов (Рис.2)). Относительно достаточное представление данных для азимутальной инверсии начинается с удаления  $\sim 1500$  метров и угла падения (на целевом интервале)  $\sim 16$  градусов. Таким образом, при таких параметрах выполнения регуляризации примерно в половине углового диапазона для азимутальной инверсии данных явно недостаточно. Это известный недостаток регуляризации с параметризацией по «площадкам OVT».



*Рис. 2. Слева схема расположения пунктов взрыва и пунктов приёма для одной ОСТ после регуляризации по варианту площадок OVT.*

*Справа гистограмма распределения трасс в сейсмограмме ОСТ по азимутам ПВ-ПП ( $dx$  – минимальное удаление, при стандартном размере площадки OVT составляет 425 метров;  - позиции ПВ и ПП, цветом показан азимут направления ПВ-ПП (-180; +180 градусов), цветовая шкала азимута представлена на гистограмме распределения по азимутам справа;  - позиция ОСТ)*

На практике для исправления этого недостатка часто используют разные технологические приёмы, например, дополнительный прогон регуляризации только для ближних и средних удалений с параметрами, отличающимися от основного расчёта, что позволяет получить дополнительный набор данных в ближних и средних удалениях и улучшить показатели распределения в этом интервале удалений. Правда характеристики регулярности полученных данных при этом нарушаются. При выполнении работы в описыва-



наилучший результат получается при выполнении этой части подготовки данных на этапе обработки с применением 5D-регуляризации.

Выполненное тестирование азимутальной инверсии по двум вариантам 5D регуляризации с миграцией (OVT параметризация и по азимутальным секторам) показало, что AVA характеристики лучше выражены и лучше определяются на данных после регуляризации по «азимутальным секторам». Поэтому, окончательно, по всему объёму данных была выполнена 5D регуляризация в варианте параметризации «по азимутальным секторам».

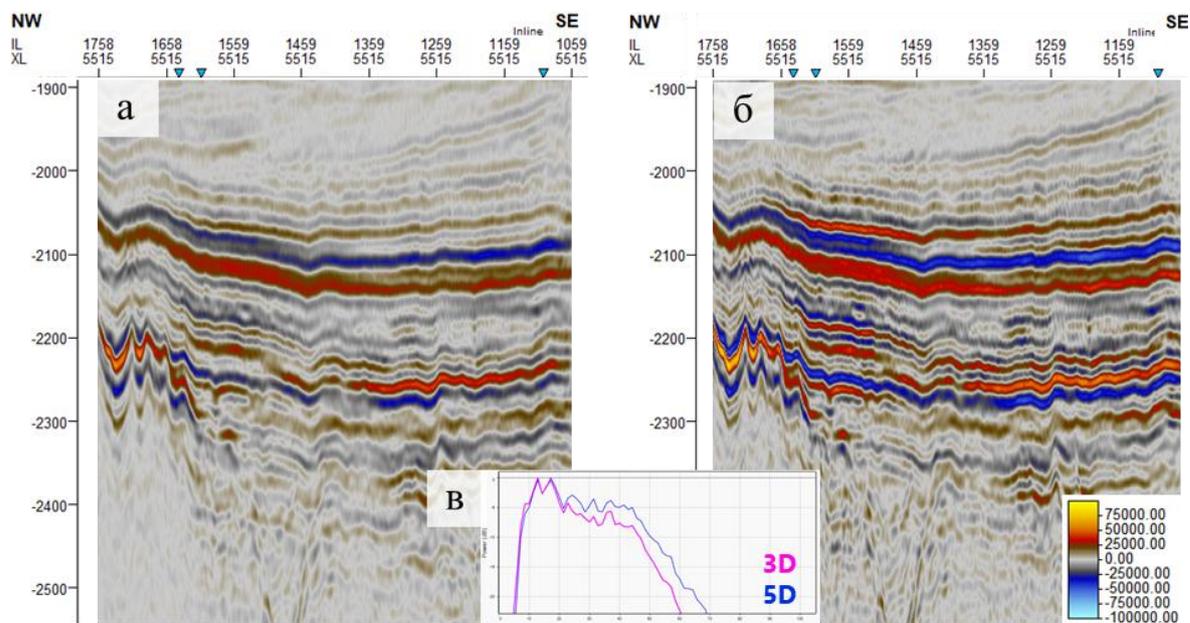
### **Сопоставление результатов традиционной и азимутальной ветвей обработки**

Как упоминалось выше, в рамках рассматриваемого проекта были реализованы два независимых варианта обработки одного и того же объема сейсмических данных. Первый вариант, основанный на применении 3D регуляризации, использовался преимущественно для актуализации сейсмогеологической модели целевых среднеюрских отложений. Вторым вариантом, с применением 5D регуляризации и сохранением азимутальной информации, был предназначен для выполнения азимутальной инверсии с последующим анализом характеристик анизотропии, обусловленной трещиноватостью баженовско-абалакского комплекса (БАК).

Наличие двух вариантов обработки обеспечило возможность прямого сопоставления полученных результатов как на качественном, так и на количественном уровнях.

Сравнение на качественном уровне осуществлялось методом визуального анализа сейсмических разрезов и их сопоставления между двумя вариантами обработки. По результатам анализа установлено, что сейсмические разрезы, полученные после азимутальной обработки с 5D регуляризацией,

характеризуются более высокой степенью устойчивости отражений, большей динамической выразительностью, а также незначительным увеличением разрешенности сейсмической записи. Указанные выводы подтверждаются результатами спектрального анализа, выполненного по амплитудно-частотным характеристикам сейсмических сигналов (Рис. 4).



**Рис. 4. Фрагменты сейсмических разрезов после 3D (а) и 5D регуляризации (б) и их амплитудно-частотные спектры (в)**

Количественная оценка была выполнена по двум основным метрикам: коэффициентам корреляции между сейсмическими данными и кривыми привязанных скважин, а также зависимости распределения амплитуд с удалением на временах, соответствующих кровле абалакской свиты. Привязка выполнена по четырем скважинам, дополнительно оценка зависимости амплитуд с удалением произведена в четырех произвольно выбранных точках, локализованных в зонах с различными поверхностными условиями возбуждения сейсмического сигнала (болотистая местность, лесной покров, речная долина).

Результаты количественного анализа показывают, что для данных после азимутальной обработки с применением 5D регуляризации значения коэффициентов корреляции в среднем превышают аналогичные показатели

для данных традиционной 3D обработки на ~15% (Табл. 1), что подтверждает более высокую степень соответствия сейсмической информации данным по скважинам.

Таблица 1

*Коэффициенты корреляции*

Скважина	Поверхностные условия	AVO-анализ		Привязка скважин	
		3D	5D	3D	5D
sk. 1	лес, река	0,76	0,85	0,57	0,78
sk. 2	лес	0,71	0,86	0,68	0,76
sk. 3	болото	0,73	0,87	0,63	0,74
sk. 4	болото	0,58	0,88	0,75	0,80
P1	болото	0,76	0,83		
P2	болото	0,75	0,87		
P3	лес	0,75	0,85		
P4	река	0,66	0,84		

**Выполнение азимутальной инверсии, анализ анизотропии**

Одной из ключевых задач рассматриваемого проекта являлось выделение зон распространения трещиноватого коллектора баженовско-абалакского комплекса (БАК). Для её решения была выполнена азимутальная инверсия по алгоритму PP AVOZ (Aki & Richards) [4], реализованному в модуле Simultaneous Seismic Inversion программного комплекса Petrel.

В расчётах использовались 30 сейсмических кубов, полученных из пяти угловых диапазонов, каждый из которых был дополнительно разбит на шесть азимутальных секторов. В качестве входных данных применялись усреднённые по скважинам детерминистические импульсы и модели низкочастотных трендов по следующим параметрам: P-импеданс, отношение скоростей  $V_p/V_s$  и плотность.

В результате инверсии были получены кубы упругих параметров: P- импеданс, «быстрый» и «медленный» S-импедансы, а также плотность.

Для количественной оценки качества инверсии проведён анализ соответствия между расчётными и скважинными значениями упругих параметров на основе кроссплотов в интервале баженовско-абалакского комплекса.

Расчёты показали высокий уровень корреляции между модельными и скважинными данными: коэффициент корреляции составил 0,88 для Р-импеданса, 0,92 — для «медленного» S-импеданса и 0,87 — для «быстрого» S-импеданса. Плотность восстанавливается с несколько меньшей точностью, однако демонстрирует удовлетворительное согласование с данными по скважинам — коэффициент корреляции равен 0,63.

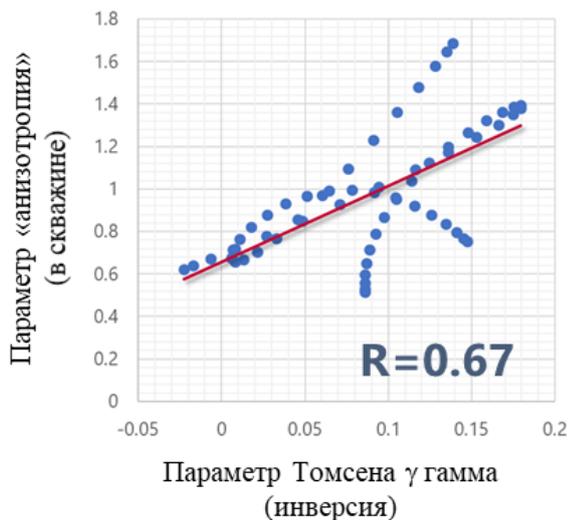
Различие в скоростях распространения «быстрых» и «медленных» поперечных волн, а, следовательно, и соответствующих S-импедансов отражает степень анизотропии среды и может быть количественно описано с помощью параметра Томсена  $\gamma$  (гамма).

Параметр Томсена  $\gamma$ , пропорциональный плотности трещин [5], может быть рассчитан как по значениям скоростей S-волн, так и по соответствующим значениям S-импедансов, полученным в результате инверсии [6]. Формула (1) для его расчёта имеет следующий вид:

$$\gamma = \frac{V_{S\parallel}^2 - V_{S\perp}^2}{2V_{S\perp}^2} = \frac{Z_{S\parallel}^2 - Z_{S\perp}^2}{2Z_{S\perp}^2} \quad (1)$$

где  $V_{S\parallel}$  - «быстрая» скорость поперечной волны,  $V_{S\perp}$  - «медленная» скорость поперечной волны,  $Z_{S\parallel}$  - «быстрый» S-импеданс,  $Z_{S\perp}$  - «медленный» S-импеданс.

Количественная оценка параметра  $\gamma$  выполнена по результатам кросс-плот-анализа в интервале БАК. Коэффициент корреляции между расчётными и скважинными значениями  $\gamma$  составил 0,67 (Рис. 5), что свидетельствует о приемлемом качестве восстановления параметра и позволяет использовать его для прогноза распространения трещиноватых коллекторов в межскважинном пространстве.



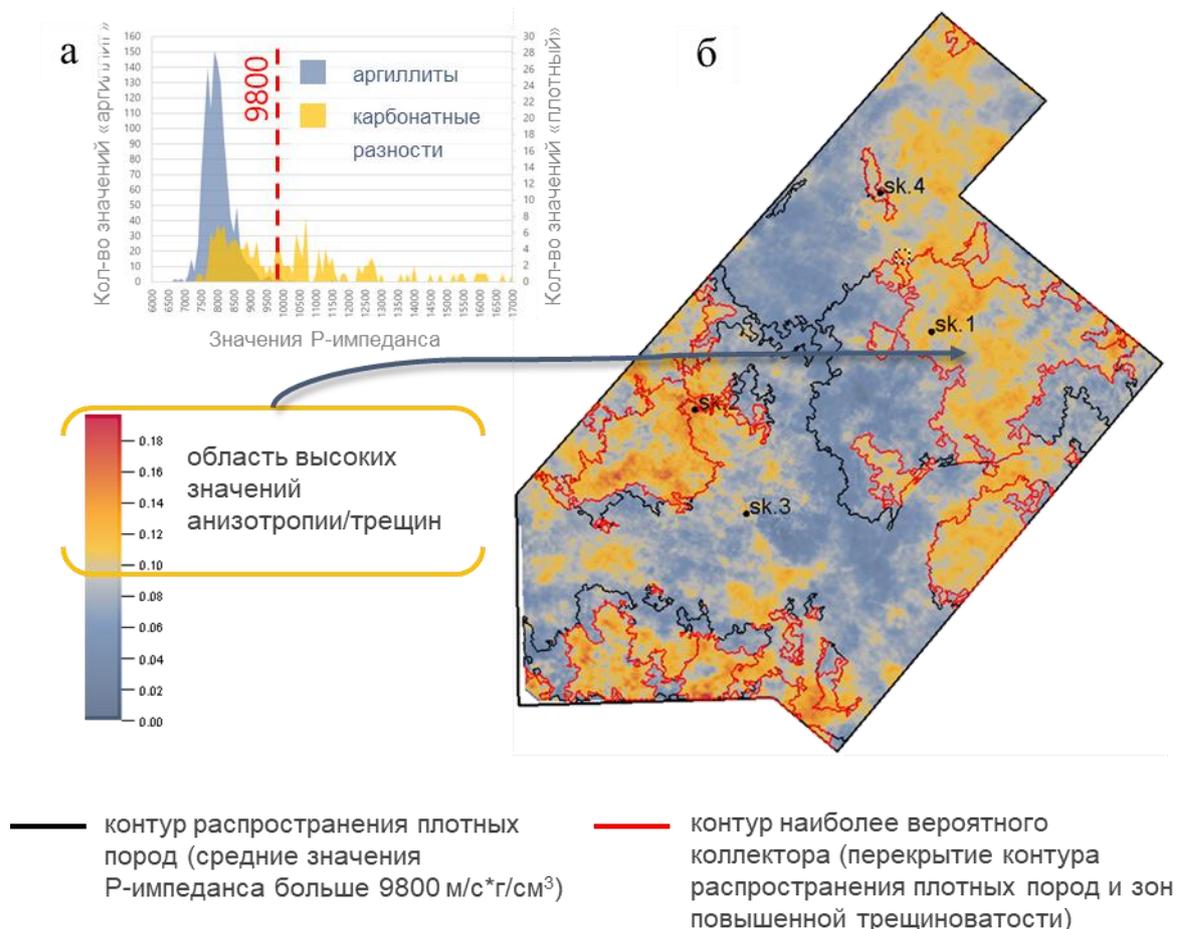
**Рис. 5. Зависимость параметра Томсена  $\gamma$  от значений анизотропии в скважине, в интервале БАК**

Результат интерпретации зон развития потенциального трещиноватого коллектора представлен на примере отложений пласта Ю1 абалакской свиты. Работа проводилась на качественном уровне с применением результатов азимутальной инверсии.

На основании фациального анализа установлено, что в пределах пласта Ю1 коллекторами являются преимущественно карбонатные разности, сформировавшиеся в условиях ограниченной пористости. Их коллекторские свойства определяются в первую очередь наличием и степенью развитости трещиноватости, тогда как первичная пористость играет второстепенную роль. С учётом анализа ГИС и данных керна эти карбонатные образования были объединены в единый литотип — плотные породы, обладающие низкой фильтрационно-емкостной способностью при отсутствии трещиноватости, но потенциально эффективные при её наличии.

Данный литотип хорошо выделяется в поле значений Р-импеданса. На основе анализа гистограммы по скважинным данным и классификации литотипов установлено пороговое значение Р-импеданса, равное  $9800 \text{ м/с} \cdot \text{г/см}^3$ , по которому выполнена дифференциация интервала

БАК с высокой долей плотных пород. Используя карту распределения средних значений  $P$ -импеданса в интервале абалакской свиты и установленное пороговое значение, был получен контур распространения плотных карбонатных пород (Рис. 6).



**Рис. 6.** Пример прогноза трещиноватого коллектора в интервале пласта Ю1 абалакской свиты (а – гистограмма распределения литотипов в поле  $P$ -импеданса; б – карта средних значений параметра  $\gamma$  (гамма) в интервале пласта Ю1 абалакской свиты)

Прогнозирование зон повышенной трещиноватости основано на анализе пространственного распределения параметра  $\gamma$  (гамма). Параметр  $\gamma$  отражает степень сейсмической анизотропии, вызванной направленной трещиноватостью, и является величиной, пропорциональной плотности трещин в среде [5]. Области высоких значений параметра  $\gamma$  интерпретируются

как зоны с высокой концентрацией преимущественно ориентированных трещин, обладающих фильтрационно-емкостными свойствами.

Таким образом, область распространения плотных пород, выделенная по значениям  $P$ -импеданса, рассматривается как потенциальная зона развития коллектора. Наиболее вероятными участками эффективного коллектора являются области перекрытия контуров плотных пород и зон повышенной трещиноватости, определённых по значению параметра  $\gamma$  (Рис. 6).

Сопоставление распределений  $P$ -импеданса и параметра  $\gamma$  позволило выявить внутреннюю неоднородность литотипа по степени трещиноватости. Анализ показал, что даже в пределах литологически однородного объема наблюдаются значительные вариации параметра  $\gamma$ , указывающие на неравномерное развитие трещиноватости. Это, в свою очередь, позволяет более точно локализовать зоны с наибольшим коллекторским потенциалом и, как следствие, снизить геологические риски при бурении.

### **Выводы**

При выполнении азимутальной обработки сейсмических данных 3D был выбран вариант параметризации 5D регуляризации для подготовки данных, наиболее соответствующих требованиям азимутальной инверсии. Азимутальная обработка сейсмических данных 3D с 5D регуляризацией с параметризацией по азимутальным секторам позволила провести расчет азимутальной инверсии, что привело к успешному решению задачи прогноза трещиноватых коллекторов в пределах баженовско-абалакского комплекса.

### Список литературы

1. Daniel Trad, "Wide Azimuth Interpolation." 68th EAGE Conference and Exhibition Incorporating SPE EUROPEC 2006
2. Daniel Trad, (2008), "Five dimensional seismic data interpolation", SEG Technical Program Expanded Abstracts: 978-982.
3. Jon Downton, Lee Hunt, Daniel Trad, Scott Reynolds, and Scott Hadley "5D interpolation to improve AVO and AVAz: a quantitative case history", Canadian journal of exploration geophysics vol. 37, №. 1 (June 2012), p. 8-17
4. Орехов, А. Н. Возможности геофизических методов для прогнозирования трещиноватости коллекторов / А. Н. Орехов, М. М. М. Аmani // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 6. – С. 198-209. – DOI 10.18799/24131830/2019/6/2140. – EDN JLXТАР.
5. Гриневский, А. С. Методы анализа сейсмических данных для изучения анизотропии горных пород, вызванной трещиноватостью: специальность 25.00.10 "Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Гриневский Антон Сергеевич, 2021. – 161 с. – EDN HFYHSN.
6. Bakulin, A. Estimation of fracture parameters from reflection seismic data-Part II: Fractured models with orthorhombic symmetry / A. Bakulin, V. Grechka, I. Tsvankin // Geophysics. – 2000. – Vol. 65, No. 6. – P. 1803-1817. – DOI 10.1190/1.1444864. – EDN LGCHML.

### References

1. Daniel Trad Wide Azimuth Interpolation. 68th EAGE Conference and Exhibition Incorporating SPE EUROPEC 2006 (in English)
2. Daniel Trad (2008) Five-dimensional seismic data interpolation, SEG Technical Program Expanded Abstracts: 978-982. (in English)
3. Jon Downton, Lee Hunt, Daniel Trad, Scott Reynolds, and Scott Hadley 5D interpolation to improve AVO and AVAz: a quantitative case history. Canadian journal of exploration geophysics, vol. 37, No. 1 (June 2012), p. 8-17 (in English)
4. Orekhov A.N., Amani M.M. Vozmozhnosti geofizicheskikh metodov dlya prognozirovaniya treshchinovatosti kollektorov [Potential of geophysical techniques for predicting reservoir-scale fracturing]. Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering. 2019, vol. 330, No.6, pp.198-209. DOI 10.18799/24131830/2019/6/2140. – EDN JLXТАР. (in Russian)
5. Grinevsky A.S. Metody analiza sejsmicheskikh dannyh dlya izucheniya anizotropii gornyh porod, vyzvannoj treshchinovatost'yu [Seismic data analysis to study rock anisotropy associated with rock fracturing]. PhD thesis: 25.00.10. 2021, 161 p. EDN HFYHSN. (in Russian)
6. Bakulin A., Grechka V., Tsvankin I. Estimation of fracture parameters from reflection seismic data-Part II: Fractured models with orthorhombic symmetry. Geophysics, 2000, vol. 65, No. 6, pp. 1803-1817. DOI 10.1190/1.1444864. – EDN LGCHML. (in Russian)

### Сведения об авторах

*Правдухин Андрей Петрович*, эксперт, ООО «Тюменский нефтяной научный центр», ПАО «НК Роснефть»  
 Россия, 625000, Тюмень, ул. Осипенко, 79/1  
 E-mail: [pravdukhin@tnnc.rosneft.ru](mailto:pravdukhin@tnnc.rosneft.ru)

*Шахов Андрей Васильевич*, заведующий сектором, ООО «Тюменский нефтяной научный центр», ПАО «НК Роснефть»  
Россия, 625000, Тюмень, ул. Осипенко, 79/1  
E-mail: avshakhov@tnnc.rosneft.ru

#### **Authors**

*A.P. Pravdukhin*, expert, Tyumen Petroleum Research Center LLC, “NC Rosneft”  
79/1, Osipenko Str., Tyumen, 625000, Russian Federation  
E-mail: appravdukhin@tnnc.rosneft.ru

*A.V. Shakhov*, head of sector, Tyumen Petroleum Research Center LLC, “NC Rosneft”  
79/1, Osipenko Str., Tyumen, 625000, Russian Federation  
E-mail: avshakhov@tnnc.rosneft.ru

*Статья поступила в редакцию 21.07.2025*

*Принята к публикации 16.09.2025*

*Опубликована 30.09.2025*