

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ НЕФТЕГАЗОВОЙ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ  
ИМ. А.А. ТРОФИМУКА  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

*На правах рукописи*

ЛАПКОВСКИЙ ВЛАДИМИР ВАЛЕНТИНОВИЧ

**МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ СТРАТИГРАФИЧЕСКИХ,  
СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКИХ, СТРУКТУРНЫХ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ  
МОДЕЛЕЙ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ  
МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ**

25.00.12 – геология, поиски и разведка нефтяных и газовых месторождений

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

доктора геолого-минералогических наук

Новосибирск – 2018

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	7
ГЛАВА 1 ПРОБЛЕМАТИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ СИСТЕМ ЧЕРЕЗ ОПЫТ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ .....	18
ГЛАВА 2 КОРРЕЛЯЦИЯ РАЗРЕЗОВ СКВАЖИН КАК ЗАДАЧА ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ .....	26
Предисловие ко второй главе .....	26
2.1 Геологические основы автоматической корреляции разрезов скважин .....	29
2.1.1 Корреляция тел, границ, произвольных точек разреза .....	29
2.1.2 Используемые данные .....	30
2.2 Математические основы корреляции разрезов скважин .....	32
2.3 Корреляционная линия и ее свойства .....	39
2.4 Сопоставление разрезов двух скважин .....	40
2.4.1 Используемые меры сходства каротажных кривых .....	40
2.4.2 Вычисление функции различия для одного вида каротажной кривой .....	41
2.4.3 Вычисление функции расстояния по нескольким каротажным кривым .....	43
2.5 Вычисление функции различия одновременно для нескольких скважин .....	44
2.6 Методы построения корреляционной линии .....	47
2.6.1 Построения для двух скважин .....	47
2.6.2 Построение корреляционной линии методом оптимального присоединения ..	49

2.7 Контроль качества полученных решений и их редактирование корреляционных моделей.....	51
2.8 Факторы, влияющие на результаты корреляции .....	52
2.9 Расстановка границ на разрезах скважин .....	61
ГЛАВА 3 ОБОБЩЕННЫЙ ОБРАЗ СКВАЖИН ПО ДАННЫМ ГИС .....	65
3.1 О методе обобщенного фотопортрета.....	65
3.2 Задачи решаемые на основе создания обобщенной скважины .....	66
ГЛАВА 4 НЕПРЕРЫВНАЯ СЕЙСМОСТРАТИГРАФИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАК ОСНОВА СТРУКТУРНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РАЗРЕЗОВ МОГТ .....	76
4.1 Непрерывная сейсмостратиграфическая модель .....	76
4.2 Метод построения непрерывных сейсмостратиграфических моделей .....	85
4.3 Проблема фазового скольжения корреляционных линий и её решение .....	88
4.4 Тестирование возможностей использования непрерывной сейсмостратиграфической модели для решения задач интерпретации геолого- геофизических данных.....	94
4.4.1 Модель формирования рельефа фундамента осадочного бассейна.....	95
4.4.2 Модель заполнения осадочного бассейна.....	96
4.4.3 Примеры использования сейсмостратиграфической модели .....	101
4.5 Возможность учета отражающих горизонтов, прослеженных по фазовым особенностям при построении сейсмостратиграфических моделей .....	104
4.6 Оценка качества прослеживания отдельных горизонтов.....	107

4.7 Построение согласованных сейсмостратиграфических моделей для групп профилей .....	107
4.8 Построение трехмерных сейсмостратиграфических моделей для связной системы 2D профилей и кубов .....	110
4.9 Решение задачи межскважинной корреляции пластов с использованием непрерывной сейсмостратиграфической модели.....	112
<b>ГЛАВА 5 МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СТРУКТУРНЫХ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ .....</b>	<b>114</b>
5.1 Некоторые сведения о кригинге и многомерных сплайнах.....	114
5.1.1 Кригинг .....	114
5.1.2 Многомерные сплайны .....	120
5.1.3 Связи кригинга и сплайнов .....	123
5.2 Применение кригинга и натуральных сплайнов при построении сейсмогеологических моделей.....	125
5.2.1 Подготовка данных для построения моделей геолого-геофизических поверхностей.....	125
5.3 Учет разрывных нарушений при построении и анализе двумерных моделей геологических поверхностей.....	132
5.3.1 Двухкомпонентные модели приближаемого поля .....	136
5.4 Реализация технологии аппроксимации поверхностей с заданными глобальными ограничениями.....	142
5.5 Построение карт с учетом регрессионных зависимостей .....	144

5.5.1 Пример использования модуля RegressGridding .....	147
5.6 Построение трехмерных моделей геологических объектов .....	151
5.7 Построение сеточных моделей сложнодислоцированных осадочных толщ .....	156
5.8 Создание сейсмического куба по набору сейсмических разрезов .....	164
<b>ГЛАВА 6 ТРАНСФОРМАЦИИ И АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МОДЕЛЕЙ</b>	
<b>ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ.....</b>	<b>169</b>
6.1 Необходимость преобразования моделей при изучении геологических объектов	169
6.2 Дифференциальные преобразования моделей геологических поверхностей.....	169
6.3 Выделение типовых геоморфологических и тектонических форм поверхностей слоев с применением вращающихся палеток.....	172
6.3.1 Выделение эрозионных форм рельефа.....	178
6.3.2 Типизация рельефа района Новосибирского Академгородка на основе карт мер сходства с шаблонными формами .....	183
6.3.3 Выделение амплитудных разрывных нарушений.....	187
6.3.4 Выделение малоамплитудных разрывных нарушений .....	193
<b>ГЛАВА 7 ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ МЕТОДОВ</b>	
<b>ПОСТРОЕНИЯ СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ЮРСКО-МЕЛОВЫХ</b>	
<b>ОТЛОЖЕНИЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ .....</b>	<b>198</b>
7.1 Краткая геолого-геофизическая характеристика объекта моделирования .....	198
7.1.1 Сейсмогеологические мегакомплексы мезозойско-кайнозойского осадочного чехла.....	199

7.2 Принципы выделения и трассирования разрывных нарушений, методика построения карт изохрон и структурных карт .....	204
7.1 Краткая характеристика результатов структурных построений .....	222
7.2 Корреляционная модель строения яронгской свиты на Геофизической площади	223
7.2.1 Выбор объекта моделирования .....	223
7.2.2 Определение границ стратиграфического диапазона яронгской свиты в скважинах .....	224
7.2.3 Послойная корреляция отложений яронгской свиты .....	229
Заключение .....	238
Список литературы .....	241

## ВВЕДЕНИЕ

Россия располагает уникальными ресурсами и запасами нефти и газа и многие десятилетия занимает одно из первых мест в мире по добыче этих полезных ископаемых. Эти позиции Россия может и должна сохранить на весь XXI век.

Однако поиски, разведка и освоение месторождений нефти и газа во всем мире становятся все более сложным и инвестиционно емким процессом. Объектами поисков, разведки и разработки наряду с традиционными месторождениями углеводородного сырья все больше становятся нетрадиционные ресурсы, такие как нефть и газ низкопроницаемых песчаников и карбонатных коллекторов, нефть и газ высокоуглеродистых сланцевых пород, нефть и газ сложно построенных объектов, в том числе в регионах на древних и молодых платформах, где осадочные породы насыщены интрузиями долеритов, нефть и газ на больших глубинах осадочных бассейнов на континентах, нефть и газ глубоководных океанических бассейнов, нефть и газ на шельфах морей Северного Ледовитого океана, газ морских залежей в гидратной форме и др. Все эти проекты являются дорогостоящими и, чтобы сделать их эффективными, необходимы новые технологии и поиски путей их удешевления.

В таких и подобных ситуациях, когда государства и компании несут огромные затраты («длинные деньги» при очень высоких рисках) на получение исходной геологической и геофизической информации, исключительно важное значение имеет глубокая и качественная её обработка и интерпретация. Использование современных информационных технологий и методов математического моделирования позволяет более полно извлекать полезную информацию о геологических свойствах и строении изучаемых объектов. В этом направлении достигнуты значительные успехи и существуют индустриальные программные комплексы интерпретации геолого-геофизических данных и построения моделей среды. Однако, несмотря на это, потребности в интерпретационных технологиях с большим пространственным разрешением и глубоким извлечением полезной информации остаются не в полной мере удовлетворены.

Автор на протяжении многих лет занимался разработкой и совершенствованием методов построения пространственных и параметрических моделей нефтегазоносных комплексов и этот опыт позволил сделать заключение о том, что большая часть задач, в этой области, могут быть либо полностью сформулированы как задачи математической

оптимизации, либо содержат в себе их существенную долю. Именно в связи с оптимизационными подходами развивались методы корреляции разрезов скважин, построения непрерывных сейсмостратиграфических моделей, поиск типовых геоморфологических и структурных форм и ряд других. Представленная работа направлена на создание новых и развитие существующих автоматизированных методов геологической интерпретации и моделирования перспективных геологических объектов с использованием оптимизационных подходов, что и определяет **актуальность выбранной темы**.

**Степень разработанности темы.** Применительно к задачам построения моделей геологического строения и распределения свойств в среде история использования математических методов насчитывает не одно десятилетие. Не затрагивая вопросы развития традиционных методов структурного картирования в нефтегазоносных районах, которые в XIX и XX веках разрабатывались усилиями многих геологов (Griswold W.T., Munn M.J., Калицкий К.П., Карапетов А.М., Губкин И.М., Чепиков К.Р. и многие другие), отметим, что впервые поверхности слоев как конечные, непрерывные, гладкие функции двух переменных были рассмотрены П.К. Соболевским в статье «Современная горная геометрия» [Соболевский, 1932]. Им было показано, что карты изолиний являются не только наглядными моделями геологических поверхностей, но и средством проведения операций над ними. Разработанная П.К. Соболевским система графо-математических процедур позволила выполнять такие операции как сложение, вычитание, умножение, деление, возведение в степень, взятие логарифмов, дифференцирование и интегрирование карт изолиний. Это сделало метод изолиний важнейшим инструментом количественного анализа морфологии геологических тел, подсчета объемов тел и запасов месторождений, решения геолого-экономических задач.

Позднее активно развивались математические методы картирования геологических поверхностей, основанные на решении задач аппроксимации функций двух переменных. В настоящее время имеются промышленные пакеты (Petrel Schlumberger, Roxar Emerson Electric, IHS Kingdom, ГИС ИНТЕГРО ВНИИгеосистем, ПАНГЕЯ ЗАО ПАНГЕЯ и другие), позволяющие строить модели сложных поверхностей с многочисленными разрывами. Тем не менее ряд вопросов в этом направлении остаются не решенными.

Вторым направлением, в котором автор прилагал значительные усилия, является использование математического аппарата при решении задач корреляции разрезов



скважин по данным их геофизических исследований. Методы автоматической корреляции, пытались создать с 60-х годов прошлого века. Вот что по этому поводу пишут А.С. Кашик с соавторами «Данная задача легко формализуется, что породило множество попыток разработать автоматическую корреляцию скважин. Практически все они оказались неудачными, в результате чего автоматическая корреляция скважин превратилась в сомнительную проблему, сравнимую разве что с проблемой «вечного двигателя» [Кашик и др., 2010]. И невозможно не согласиться с дальнейшими оценками этих авторов о том, что успешно задача корреляции может быть решена, только в рамках интерактивных подходов. Во всяком случае, это справедливо для сложных геологических ситуаций.

Ряд теоретических вопросов в данной области освещены в работах Ю.А. Воронина, Ю.А. Косыгина и Ю.С. Салина. Одно из интересных направлений здесь связано с постановкой задачи стратиграфической корреляции как интегрально-оптимизационной. Здесь пионерской работой была небольшая статья Б. Жековского [Jekhowsky B., 1963], а затем появилась серия работ Ш.А. Губермара и М.И. Овчинниковой, Ю.Ф. Гришкевича, Ю.С. Гутмана с соавторами, Е.В. Ковалевского и других, в которых это направление активно развивалось. Достаточно подробно состояние данной проблемы освещены в диссертации Н.С. Бурлакова [2014], в которой подробно описаны существующие методики. В данной работе проблема корреляции рассматривается в оптимизационной постановке. И полученные автором решения были доведены до реализации в интегральный промышленный пакет. Также в этой тематике имеется ряд проблем не полностью решенных. При корреляции на площади с большим числом скважин возникает неприятная проблема нестыковки частных парных корреляционных решений. Интересным представляется и развитие проблематики построения обобщенной модели скважины по результатам полученной корреляции.

Задача совместной интерпретации геологических и геофизических данных неисчерпаема. Поэтому, необходимо более конкретно очертить проблематику исследования. Автор сосредоточил основное внимание на процедурах, абсолютно необходимых при геологической интерпретации, но плохо формализуемых и в большинстве случаев, по-прежнему решаемых «вручную», в которых явно выражена оптимизационная составляющая. К таким задачам можно отнести: построение корреляционных стратиграфических схем, создание обобщенных «портретов» скважин,

создание непрерывных сейсмостратиграфических моделей, методов картирования объектов со сложной разрывной тектоникой. Важным перспективным направлением является использование сложных сеток и создания моделей на основе вычисления изоуровневых поверхностей функций трех переменных. Как раз эти задачи остались плохо проработанными и недостаточно автоматизированными в широко используемых промышленных программных продуктах.

**Объектом исследования** диссертационной работы являются отложения осадочных чехлов нефтегазоносных бассейнов. При этом они рассматриваются в разных масштабах от отдельных залежей до крупных месторождений и нефтегазоносных областей.

Отметим, что разрабатываемые автором методы применимы к большинству бассейнов мира, но их создание, опробование и практическое использование, в первую очередь, проводилась на объектах Западной и Восточной Сибири.

**Цель исследования** - совершенствование комплекса эффективных средств построения стратиграфических, сейсмогеологических, структурных и параметрических моделей осадочных толщ нефтегазоносных бассейнов для изучения их строения, распределения их свойств и прогноза нефтегазоносности.

Цель исследования достигается решением следующих *задач*:

1. Усовершенствовать метод автоматической попластовой, детальной корреляции разрезов скважин по данным ГИС на основе вычисления оптимальных корреляционных сопоставлений между каротажными диаграммами с использованием парных и многомерных мер различия, не допуская возникновения невязок при площадной корреляции скважин.

2. Разработать метод создания обобщенных геолого-геофизических моделей по данным ГИС, позволяющий осуществлять анализ устойчивых свойств и индивидуальных особенностей геологических тел и осадочных комплексов, прогнозировать геолого-геофизические разрезы проектируемых скважин и создавать трехмерные модели распределения геофизических и петрофизических характеристик геологических объектов.

3. Сформулировать концепцию и разработать метод создания непрерывных двумерных и трехмерных сейсмостратиграфических моделей на основе комбинаций парных сопоставлений сейсмических трасс, обеспечивающих высокоточную количественную параметризацию разрезов и кубов МОГТ, по заданному временному или глубинному интервалу.

4. Разработать методические приемы трансформаций структурных поверхностей и частично реализовать технологию вычисления морфологических характеристик числовых моделей осадочных комплексов, позволяющую выявлять типовые тектонические и геоморфологические формы сложных геологических объектов.

#### **Методология и методы диссертационного исследования.**

Теоретические основы работы составляют вычислительные методы создания пространственных моделей осадочных толщ: расчленение и корреляция геологических разрезов, построение структурных карт, построение карт толщин и распределения свойств. При разработке и совершенствовании методов интерпретации геолого-геофизических данных автор опирался на сведения из таких областей как теория распознавания образов, нелинейная оптимизация, динамическое программирование, регрессионный анализ, сплайн-аппроксимация, геостатистика и кригинг.

**Фактический материал.** На протяжении многих лет автор участвовал в фундаментальных и прикладных исследованиях по построению моделей и оценке перспектив нефтегазоносности территорий Западной и Восточной Сибири. Геолого-геофизические данные и конкретные решения, полученные в этих исследованиях, послужили фактической основой представленной работы [Конторович и др., 2006а, б, 2011, 2013, 2014а, б; Филиппов и др., 2009; Лапковский 2012; Лапковский и др., 2015, 2018]. Часть результатов получена на искусственно созданных модельных объектах. Также основой для написания работы служили результаты тысяч вычислительных экспериментов, выполненных автором, для проведения которых, был создан комплекс программ соответствующей направленности.

Часть результатов была получена автором в совместных исследованиях и опубликована вместе с В.А. Конторовичем, Б.В. Лунёвым, а также с магистрантами, у которых автор был научным руководителем – В.А. Бердовым и Н.Е. Шмелевым,

фрагменты в том числе и совместных работ, написанные преимущественно автором включены в диссертацию [Конторович и др., 2014а, б; Лапковский и др., 2015; 2018].

**Научная новизна выполненных исследований и личный вклад автора** определяется следующим:

1. Разработан новый метод оптимальной корреляции геологических тел (пластов) по данным ГИС на основе вычисления парных и многомерных мер различия фрагментов разрезов скважин, и отыскания минимума целевой функции в пространстве допустимых решений. Этот результат при площадной корреляции скважин позволяет избежать проблемы возникновения невязок на замкнутых контурах корреляции, поскольку каждая новая скважина, присоединяемая к решению оптимальным образом, согласуется со всеми входящими в модель связанные с ней скважинами.
2. Предложен способ создания обобщенных образов стратиграфических тел по каротажным данным, позволяющий анализировать устойчивые свойства и индивидуальные особенности групп скважин, прогнозировать геолого-геофизические разрезы проектируемых скважин, а также создавать трехмерные модели распределения геофизических и петрофизических характеристик геологических объектов.
3. Разработана идея непрерывной сейсмостратиграфической параметризации разрезов и кубов МОГТ. Предложен и защищен как изобретение (патент на изобретение № 2616590, 24 марта 2014) способ построения непрерывных сейсмостратиграфических моделей на основе оптимального взаимного отображения, заданного временного (глубинного) интервала набора сравниваемых сейсмических трасс. Его использование позволяет генерировать любое число сейсмических горизонтов, выполнять строгую привязку горизонтов к фазовым особенностям волнового поля, проводить взаимную увязку моделей отдельных разрезов по линиям пересечения разрезов. Способ позволяет создавать квази-3D разрезы сейсмостратиграфического параметра по связному набору пересекающихся 2D разрезов.

4. Предложен способ создания сеточных моделей слоев на основе оптимального сопоставления их кровли и подошвы и учитывающий априорно заданное положение разрывных нарушений. Технология создания таких сеток интегрирована с построением на них непрерывных сейсмостратиграфических моделей.
5. Предложен способ создания сеточных моделей слоев на основе оптимального сопоставления их кровли и подошвы и учитывающий априорно заданное положение разрывных нарушений. Технология создания таких сеток интегрирована с построением на них непрерывных сейсмостратиграфических моделей.
6. Разработан метод поиска типовых геоморфологических или тектонических форм на основе обнаружения наилучшего соответствия моделей поверхностей геологических тел с анизотропными вращающимися эталонными палетками, каждая из которых отождествляется с некоторой морфологической формой.

**Защищаемые научные положения и результаты** заключаются в следующем:

1. Метод автоматической попластовой, детальной корреляции разрезов скважин по данным ГИС на основе вычисления оптимальных корреляционных связей между каротажными диаграммами с использованием парных и многомерных мер различия.
2. Метод создания обобщенных геолого-геофизических моделей по данным ГИС, позволяющий осуществлять анализ устойчивых свойств и индивидуальных особенностей геологических тел и осадочных комплексов, прогнозировать геолого-геофизические разрезы проектируемых скважин и создавать трехмерные модели распределения геофизических и петрофизических характеристик геологических объектов.
3. Концепция и метод создания непрерывных двумерных и трехмерных сейсмостратиграфических моделей на основе комбинаций парных сопоставлений сейсмических трасс, обеспечивающих высокоточную количественную параметризацию разрезов и кубов МОГТ, по заданному временному или глубинному интервалу.
4. Методические приемы трансформаций структурных поверхностей и технология вычисления морфологических характеристик числовых моделей осадочных

комплексов, позволяющая выявлять типовые тектонические и геоморфологические формы сложных геологических объектов.

**Достоверность научных выводов и заключений** определяется использованием математических методов, а именно современных способов оптимизации, сплайн-аппроксимации, геостатистического моделирования, спектрального анализа. Для обоснования научных положений и результатов проводилось тестирование разрабатываемых методов, как на модельных, так и на реальных объектах (мезокайнозойские отложения Медвежьего, Геофизического, Сузунского месторождений Западной Сибири, верхнеюрские отложения Нюрольской мегавпадины, клиноформный комплекс Западно-Сибирской плиты, карты рельефа области ленточных боров Алтайского края, рельеф района новосибирского Академгородка). Выполнены тысячи вычислительных экспериментов. При геологической оценке результатов привлекались надежные информационные базы данных ИНГГ СО РАН для сравнения расчетных параметров со свойствами реальных объектов.

**Теоретическая и практическая значимость.** Предложен оригинальный способ корреляции разрезов скважин по данным ГИС. Сформулирована постановка задачи корреляции произвольного числа скважин в оптимизационной постановке с использованием многомерных мер различия. Для интерпретации разрезов и кубов МОГТ предложено понятие **непрерывная сейсмостратиграфическая модель**, а также способ создания таких моделей на основе решения оптимизационной задачи нахождения наилучшего интервального соответствия фрагментов сейсмических трасс.

Основная практическая ценность работы связана с созданием, развитием и использованием оригинальных программных продуктов:

1. интегрированного пакета W-seis [Конторович, Лапковский, 2008; 2011];
2. программа для вычисления запасов нефти, газа и попутных полезных компонентов Estimo [Конторович, Лапковский, 2011];
3. программа построения и редактирования двумерных моделей геологических поверхностей GridBuilder-GridMaster [Конторович, Лапковский, 2014];
4. программный комплекс GISWell для интерпретации каротажных данных и построения корреляционных моделей [Лапковский, Истомин, 2013];

5. программное расширение (плагин) комплекса Petrel Schlumberger для автоматической корреляции разрезов скважин по данным ГИС [Бердов, Власов, Лапковский, 2013; Бердов, Власов, Лапковский, 2014б];

6. библиотека программных модулей GeoLib [Бердов, Власов, Лапковский, 2012];

7. совместно со специалистами ЗАО «Пангея», создана много-платформенная библиотека *panlapk*, которая используется в методических разработках, выполняемых как в ИНГГ СО РАН, так и в ЗАО Пангея [Лурье и др., 2004].

8. Способ построения непрерывных сейсмостратиграфических разрезов кубов, оформленный как изобретение [патент на изобретение № 2616590, 24 марта 2014].

Перечисленные программные продукты широко используются в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, а также в академических, отраслевых, учебных организациях как при выполнении научных исследований.

Ниже перечислены некоторые научные проекты в выполнении которых участвовал автор, и в которых использовались разработанные методики и программные средства:

1. Научный проект **«Комплексное математическое моделирование процессов формирования и эволюции эпиконтинентальных осадочных бассейнов»** (руководитель В.В. Лапковский);

2. Междисциплинарный интеграционный проект фундаментальных исследований **«Моделирование деформаций осадочного чехла и зон трещиноватости, контролирующей миграцию и аккумуляцию углеводородов»** координатор проекта - член-корреспондент РАН, В.А. Конторович.

3. Научный проект **«Численное моделирование современной структуры и процессов формирования эпиконтинентальных осадочных бассейнов»** (руководитель: В.В. Лапковский);

4. Научный проект **«Разработка имитационной модели долгосрочного функционирования нефтегазового комплекса Российской Федерации в зависимости от состояния и качества сырьевой базы, потребностей рынка, ее программная реализация и апробация»** (руководители: В.В. Лапковский, И В. Филимонова);

Отдельные компоненты созданных программных продуктов были переданы и нашли применение в геолого-геофизических работах ряда отраслевых организаций, в том

числе: МГУ, ВСЕГЕИ, СНИИГГиМС, КрасНИИГГиМС, Сибнефтегеофизика, Центральная геофизическая экспедиция (г. Новосибирск), Томская геофизическая компания, Красноярскгеофизика, Сибгео (г. Тюмень) и других.

На протяжении многих лет программные продукты, созданные в ходе выполнения настоящего исследования, использовались при подготовке студентов геологических специальностей Новосибирского государственного университета.

Автор рассматривает завершенный и представленный ниже цикл исследований, как важный элемент работ по совершенствованию математического аппарата и алгоритмов компьютерных технологий формализации, автоматизации и оптимизации важнейших геологических процедур, используемых при реализации методов поисков и разведки месторождений нефти и газа. В работе изложены, теоретически обоснованы и на конкретных примерах апробированы компьютерные технологические решения, вносящие серьезный вклад в повышение эффективности воспроизводства минерально-сырьевой базы Российской Федерации.

**Апробация работы.** Результаты диссертации содержатся в 52 публикациях, из которых 23 – статьи в журналах их списка ВАК. Результаты исследования были представлены в сборниках всероссийских и международных конференций: «Геомодель» в 2006, 2007, 2013, 2015 годах; на II-й всероссийской науч. конф. с участием иностр. ученых в Тюмени, 2010, в Томском политехническом университете в 2007 году; на 8-м Петербургском международный форум ТЭК в 2008 г; на научном совещании по Программе фундаментальных исследований ОНЗ РАН в Иркутске в 2009 г.; всероссийской конференции в Хабаровске “Косыгинские чтения”, в 2011 г.; на научном конгрессе Гео-Сибирь в 2012, 2013, 2014 и 2018 годах; международной научно-практической конференции «Тюмень 2013»; конференции «Петромодель» в 2013 и 2015 годах (Петергоф); Fifteenth International Congress of the Brazilian Geophysical Society Рио-де-Жанейро (2017 г). На программные продукты получено пять свидетельства о государственной регистрации. Способ построения непрерывных сейсмостратиграфических моделей разрезов\кубов запатентован как изобретение (патент на изобретение № 2616590, 24 марта 2014).

Методы и программы, разработанные автором, успешно применялись в ИНГГ СО РАН при сейсмогеологическом моделировании на территориях Западной [Конторович и др., 2006а, б; 2011] и Восточной Сибири [Конторович и др., 2011].



**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения, объемом 273 страниц, включая 102 рисунка, 2 таблицы, библиография содержит 283 наименований.

**Благодарности.** Диссертационная работа была выполнена в тесном контакте коллегами из разных лабораторий ИНГГ им. А.А. Трофимука СО РАН. Весьма полезным для автора было участие в общих проектах и обсуждение научных проблем по теме диссертации с Л.М. Бурштейном, И.А. Губиным, С.В. Ершовым, М.О. Захряминой, А.В. Истоминым, В.А. Казаненковым, Л.М. Калининой, М.С. Канаковым, А.Э. Конторовичем, В.О. Красавчиковым, В.Р. Лившицем, Б.В. Лунёвым, С.А. Моисеевым, М.М. Немировичем-Данченко, Ю.Ф. Филипповым.

Автор на протяжении многих лет сотрудничал и получал полезные советы от специалистов ряда геологических организаций: (СНИИГГиМС, Сибнефтегеофизика, Пангея, ЦГЭ, ВСЕГЕИ, СибГео, Зап-Сиб Геоцентр и других). Автор признателен их сотрудникам: А.Н. Зайцеву, М.Ю. Зубкову, А.В. Исаеву, В.Е. Ковалевскому, В.В. Колесову, Н.М. Кропачеву, А.И. Ларичеву, М.Б. Лурье, П.Н. Мельникову, А.В. Новокрещину, А.Г. Плавнику, В.Ф. Свиньину, А.Н. Сидорову, О.А. Смирнову, В.С. Старосельцеву, В.И. Чеканову. Автор благодарен специалистам в области информационных технологий, программирования и математического моделирования В.А. Бердову, А.А. Власову, С.Е. Пономаревой, Ю.С. Шорохову, общение с которыми оказалось крайне полезным для создания достаточно эффективных программных продуктов.

Особую признательность автор выражает научному консультанту, члену-корреспонденту РАН В.А. Конторовичу, который инициировал исследования по ряду направлений, представленных в работе, и многолетнее сотрудничество с которым существенно определило содержание и качество полученных научных результатов.

## ГЛАВА 1 ПРОБЛЕМАТИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ СИСТЕМ ЧЕРЕЗ ОПЫТ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ

*Даже путь в тысячу ли начинается с первого шага.*

*Лао-цзы*

История активного проникновения математических методов в геологию началось в 60-70 годы прошлого века. И уже тогда была четко обозначена альтернатива о том, по какому пути должна двигаться «математическая геология». Один из подходов, который можно назвать «аксиоматическим» наиболее последовательно и активно развивался учеными новосибирской школы: академиком Ю.А. Косыгиным, Ю.А. Ворониным, А.М. Боровиковым, С.В. Гольдиным, Э.А. Егановым, Е.Н. Черемисиной [Воронин, Алабин, Гольдин, 1967; Воронин, Еганов, 1974]. Эти работы получили продолжение в Институте тектоники и геофизики ДВНЦ АН СССР, основанным и долгое время возглавляемым Ю.А. Косыгиным. В их развитие значительный вклад внесли В.А. Соловьев, В.Ю. Забродин, Г.Л. Кириллова, В.А. Кулындышев, Ю.С. Салин, В.И. Синюков, Р.Ф. Черкасов. Следует признать, что того результата, на который по-романтически надеялись энтузиасты данного направления – построение строгой, основанной на аксиоматике, с доказанными теоремами, геологической науки, мы так и не получили (отдельные исключения здесь [Лебедев, 2015], скорее подчеркивают справедливость этого суждения). И несмотря на то, что существует мнение о провале всего данного направления [Макаров, 2010], автор считает, что безусловная польза от существования этой школы была. В частности, благодаря определенным просветительским усилиям и стимулированию поиска новых моделей и алгоритмических решений для геолого-геофизических задач.

Другой подход к освоению математических методов в геологии связан с созданием моделей конкретных объектов. Одним из основателей этого направления был А.Б. Вистелиус [1980]. Сейчас работ, подобной направленности огромное количество, их число показывало экспоненциальный рост и в каждой области геологии можно найти сотни примеров успешного использования математических моделей. Отметим, что

работы данного направления, например, создание геоинформационных систем для территорий [Черемисина, Никитин, 2006], приводят к осмыслению теоретических основ геологической науки в целом. В данной работе нет ни возможности, ни смысла приводить весь опыт удачных частных решений использования математических методов в геологии.

Автор десятки лет применял математические методы и занимался разработкой программных продуктов для задач построения числовых моделей геологических объектов. Но первые работы в области развития собственного программного обеспечения для обработки и интерпретации данных сейсморазведки были начаты автором около пятнадцати лет назад. Их инициатором и руководителем был заведующий лабораторией «Сейсмогеологического моделирования природных нефтегазоносных систем» Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, член-корреспондент РАН Владимир Алексеевич Конторович. Лаборатория проводила фундаментальные исследования по изучению геологического строения нефтегазоносных областей Сибири, выполняла ряд договорных работ с научными, сервисными организациями и нефтяными компаниями, а также являлась базой для обучения студентов геологических специальностей Новосибирского государственного университета. Лаборатория обладала лицензиями на несколько интегрированных интерпретационных пакетов – Integral+ CGG и Seiswork Landmark. Позднее для обучения студентов стали доступны и другие продукты, такие как Kingdome Suite IHS, Petrel и PetroMod Schlumberger. Использование западного программного обеспечения имело следующее ограничение - сейсмические материалы российских компаний зачастую настолько не соответствовали промышленным стандартам, что они просто не воспринимались этими пакетами. Изначально наши амбиции в разработке программных продуктов в данной области были достаточно скромны – создать средства для исправления и редактирования некондиционных сейсмических материалов. Со временем возрастали и наши желания, и находиться в рамках задач контроля качества и редактирования данных, было уже тесно. Постепенно мы начали осваивать новые области и новые задачи. Как результат, появился интегрированный интерпретационный комплекс программ W-seis [Конторович, Лапковский, 2008; 2011]. С помощью этого продукта был выполнен огромный объем работ по интерпретации геолого-геофизических материалов Западной и Восточной Сибири, Дальнему Востоку России и шельфу арктических морей. Этот же продукт позволил обучать студентов нефтяников основам геолого-геофизической интерпретации

сейсмических и скважинных данных, с его использованием выполнены курсовые и дипломные проекты, а также кандидатские работы. Программный код первой версии W-seis практически полностью был создан мною на Borland C++ Builder 5.0. В 2011 году продукт W-seis прошел государственную регистрацию в федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам (свидетельство № 2011610211). Тем самым был подведен промежуточный итог в создании собственной среды сейсмогеологического моделирования.

В состав первого поколения W-seis входит 8 модулей, 5 – собственных и 3 ассоциированных. Собственные – это те, что разрабатывались именно как части W-seis. Ассоциированные модули – изначально были независимыми продуктами, которые и в настоящее время вполне нормально существуют обособленно, но при этом они хорошо сосуществуют со средой W-seis.

Сейчас создается новое поколение интерпретационного пакета, естественно, что при этом происходит улучшение и развитие всего функционального наполнения. Эта работа уже проводится коллективом специалистов в области геологии, геофизики и программирования. Большой вклад в разработку нового программного продукта внесли М.С. Канаков, А.В. Истомин, М.М. Немирович-Данченко, Ю.С. Шорохов. Как и прежде общее руководство этими работами осуществляет В.А. Конторович.

В реализации нового поколения программ используется среда программирования Microsoft Visual C++, среда разработки Qt и платформа создания баз данных MySQL корпорации Oracle. Основные приложения разрабатываются как кросс платформенные.

Мы изначально понимали, что таким коллективом невозможно создать всеохватывающий продукт, составляющий серьезную конкуренцию индустриальным лидерам в области разработки геолого-геофизического и технологического программного обеспечения, таким как продукты компаний Schlumberger, Roxar или IHS Global Inc, но ряд собственных решений считаем весьма удачными, и чтобы обеспечить их большую тиражируемость и доступность для специалистов отрасли, часть этих решений была продублирована в виде плагинов с использованием средств Ocean Schlumberger, которые встраиваются в программный комплекс Petrel Schlumberger. Эта работа выполнялась автором совместно с В.А. Бердовым, А.А. Власовым, С.Е. Пономаревой.

В рамках традиции решения частных геологических задач мы проектировали и развивали прикладные программные продукты, следуя от конкретных потребностей к

формулировке математических моделей и созданию интерпретационного программного обеспечения. Причем, в связи с острым и постоянным дефицитом программирующих специалистов, нам приходилось отсекать менее востребованные цели и сосредотачиваться на тех решениях, которые использовались в большей части выполняемых работ по интерпретации сейсмических и геологических материалов. Ниже приводится только перечень наиболее востребованных задач сейсмогеологического моделирования реализованных в W-seis. При этом, я оставляю в стороне задачи сугубо технологические, решение которых хотя и потребовало существенных усилий, но не имеет научного значения, во всяком случае, в рамках данной диссертационной работы, таких как: контроль качества данных, их переформатирования, разработка средств создания, наполнения, отображения, организации доступа и редактирования баз данных, создание типовых интерфейсов запросов, разработка средств визуализации и другие.

В настоящей работе не стоит цель дать общую характеристику продукта W-seis и описать его программные модули и возможности. Я начал с истории собственного погружения в проблематику интерпретации сейсмических и скважинных данных, поскольку это специфическим образом сформировало мой взгляд на весь круг задач сейсмогеологического и структурного моделирования нефтегазоносных бассейнов. А история формирования функциональных возможностей разрабатываемой среды – это определенный взгляд на то, что составляет минимально необходимый набор методов и алгоритмов, которые покрывают значительную часть стандартных задач моделирования нефтегазоносных комплексов. У нас получилось, что такой минимальный набор задач сводится к следующему списку:

- задачи преобразования данных и моделей в шкалах время-глубина-скорость;
- анализ и преобразования сейсмических разрезов и кубов;
- структурная интерпретация сейсмических разрезов и кубов;
- построение составных разрезов из нескольких базовых;
- акустическая инверсия на основе геостатистического подхода;
- создание синтетических сейсмических разрезов;
- преобразование и интерпретация каротажных данных и корреляция разрезов скважин;
- создание комплексных моделей территорий на основании сейсмических и скважинных данных.

При этом, многие из решаемых нами задач, имеют выраженную оптимизационную природу. Им и посвящена настоящая работа.

В работах таких выдающихся исследователей в области применения математических методов в геологии как Ю.А. Косыгин, Э.Э. Фотиади, Ю.А. Воронин, С.В. Гольдин, А.Э. Конторович, В.А. Соловьев, Е.Н. Черемисина и других, отмечалось, что традиционный геологический язык слабо формализован, он допускает множество толкований даже базовых понятий. Чтобы уменьшить поле неопределенности в дальнейшем изложении, дадим пояснения к некоторым понятиям, которыми автор оперирует ниже: **оптимизация, геологическая граница, непрерывная сейсмостратиграфическая модель.**

**Оптимизация.** Автором понимается в узком математическом смысле. В рамках тех постановок, которые использованы в работе оптимизация трактуется следующим образом: среди множества  $X$  элементов  $x$ , отыскать такой  $x^*$ , на котором заданная целевая функция  $f(x): X \rightarrow R$  достигает минимального значения. Причем в задачах, рассмотренных в настоящей работе почти всегда выполняются следующие условия, сужающие разнообразие оптимизационных постановок:

1. множество  $X$  не пустое,
2. критерий оптимизации нахождение минимума целевой функции,
3. целевая функция ограничена снизу нулем и не может принимать отрицательных значений.

Таким образом задача оптимизации нами всегда сводится к отысканию глобального минимума целевой функции с учетом некоторых ограничений. Из методов решения оптимизационных задач, нами использованы:

Нахождение глобального минимума путем решения системы линейных уравнений, получаемых путем дифференцирования целевой функции и условия равенства нулю всех частных производных в экстремуме - раздел 5.2.1.

Полный перебор всех элементов множества с вычислением для каждого из них значения целевой функции - раздел 6.3.

Нахождение оптимального пути с использованием муравьиного алгоритма [Dorigo, 1992] или волнового алгоритма [Lee, 1961]. В такой постановке рассмотрена задача стратиграфической корреляции и построение сейсмостратиграфических моделей в разделах 2.7, 4.2 и 5.7.

Методы динамического программирования [Беллман, 1960] для согласованной корреляции большого числа скважин - в разделе 2.7.2.

Задачи сплайн-аппроксимации и кригинга рассмотрены в работе в связи с использованием этих методов для построения двухкомпонентных моделей геологических границ с возможными разрывными нарушениями. По сути, это также оптимизационные задачи, решения для которых известны и которыми воспользовался автор.

**Геологическая граница.** В настоящей работе два вида геологических объектов рассматриваются как границы – поверхности слоистых тел разного ранга и поверхности разрывных нарушений. При этом допускается следующее существенное упрощение. В реальном мире ни один из этих объектов в строгом смысле не является поверхностью (двумерным многообразием). Рассмотрим для примера современную дельту реки Лена. Прекрасную фотографию этого природного объекта, сделанную из космоса, можно найти в фотогалереи NASA Galleries (Siberia's Lena Delta) (Рисунок 1.1). Это вид на «поверхность» стратиграфически эквивалентную кровли слоя современных осадков. Упрощая, можно предположить, что там, где современные осадки не накапливаются (вне водной среды) этой поверхности нет. То есть, данный объект поверхностью не является, а имеет фрактальную природу, уже по тому, что фрактально русло самой Лены и его фрактальная размерность оценивается как  $1.56 \pm 0.03$  [Балханов, 2013]. Такую же, или близкую размерность должно иметь тело современных русловых осадков. Точно также, любое разрывное нарушение, как и вообще системы трещин - фрактал. Осознавая фрактальную природу геологических объектов, в конструируемых моделях мы традиционно используем более простые конструкции. Стратиграфические или литологические границы рассматриваются как однозначные, относительно используемой системы координат поверхности, которые можно описать уравнением вида  $z = f(x, y)$ . Разрывные нарушения в моделях представляются поверхностями, в большинстве случаев вертикальными. Принятые упрощения не означают, что невозможно описывать неоднозначные границы (такие как поверхности слоев в опрокинутых складках), но для этого могут быть использованы преобразования координат и технология построения сложных сеточных моделей, относительно которых будет выполняться условие однозначности стратиграфических границ и вертикальности дизъюнктивов, как это показано в разделах (5.6 и 5.7).



Рисунок 1.1 - Дельта р. Лена из космоса. Siberia's Lena Delta, NASA Galleries.

**Непрерывная сейсмостратиграфическая модель.** Поясним, что в данном случае означает слово «непрерывная», и как такой класс моделей сосуществует с разрывными нарушениями. Для автора понятие **пространственная геологическая модель** означает отображение области геологического пространства на некоторую шкалу состояний. Шкала может быть дискретной и задаваться, например, некоторым упорядоченным набором отражающих горизонтов. Соответственно, модели, построенные с отображением на дискретные шкалы, понимаются как дискретные. Предложенное автором понятие **непрерывная сейсмостратиграфическая модель** [Лапковский, 2012 и раздел 3.1] предполагает конструирование отображения области пространства  $f(x \in X): X \rightarrow R$  (сейсмического разреза или куба) на непрерывный интервал вещественных чисел (например, от 0 до 1). Это означает, что любому числу  $0 \leq a \leq 1$ , можно соотнести множество точек пространства  $S$ , на которых  $f(x \in S) = a$ . Множество  $S$ , трактуемое как совокупность стратиграфически эквивалентных точек, может быть пустым, в случае, если имеют место стратиграфические перерывы. Существование разрывных нарушений в



области  $X$  приводит к тому, что по крайней мере для некоторых значений множество  $S$  будет несвязным или многосвязным. При отсутствии стратиграфических перерывов и разрывных нарушений,  $S$  топологически односвязно. Такая модель непрерывна, в том смысле, что она непрерывно параметризована по  $a$ , но при этом могут существовать разрывные нарушения, которые влияют на связность границ, а также проявляются в разрывах первого рода значений свойств (литологических, физических, химических и др.) при прохождении через них.

### **Выводы:**

1. Геологическое и сейсмогеологическое моделирование объектов нефтяной геологии как научное направление, включает в себя большое число разнотипных задач и стремление создания систем, пригодных для решения их всех, требует огромных ресурсов. При ограниченных ресурсах этот результат практически не достижим, что приводит к необходимости сосредотачиваться на наиболее востребованных задачах. За счет модульной реализации интерпретационной среды, с хорошо спланированной функциональностью и согласованными решениями, возможно создание локальной системы, позволяющей удовлетворять большую часть практических потребностей интерпретации.
2. Такой минимальный набор средств должен обеспечивать выполнение следующих функций: трансформация моделей из временной области в глубинную и обратно, трассировка сейсмических горизонтов и разрывных нарушений, создание различного рода карт, выполнение разнообразных трансформаций сейсмических записей и вычисление атрибутов в среде, инверсия сейсмических данных, решение прямой задачи расчета волнового поля, согласование сейсмических построений со скважинными данными, построение корреляционных моделей.

## ГЛАВА 2 КОРРЕЛЯЦИЯ РАЗРЕЗОВ СКВАЖИН КАК ЗАДАЧА ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ

*Лучший способ в чем-то разобраться до конца — попробовать научить этому компьютер.*

*Дональд Эрвин Кнут*

**Предисловие ко второй главе.** Эта глава у меня получилась достаточно объемной и, наверное, не очень легко читаемой. Поэтому я счел нужным кратко изложить её основную канву по пунктам:

1. *Задача корреляции скважин. Имеем две скважины и задан интервал глубин. Мы можем измерить насколько произвольная точка одной скважины, в интервале корреляции по выбранному комплексу ГИС, не похожа на произвольную точку другой скважины. То есть, вводим некоторую меру различия.*
2. *Возьмем двумерную область (планшет), по оси абсцисс будем откладывать глубины интервала корреляции в первой скважине, а по оси ординат – во второй, и с некоторым шагом по каждой из осей вычислим меру различия. То есть получим планшет с изолиниями меры различия.*
3. *Любая точка на этом планшете тождественна паре глубин в коррелируемых скважинах. То есть результат корреляции можно представить, как набор точек (или как линию) в этой двумерной области. Это так называемая «корреляционная линия». Поскольку границы слоев не пересекаются, то линия должна быть неубывающей ни по одной из осей (нестрого монотонной).*
4. *Далее, если мы соглашаемся с тем, что слои воспринимаются таковыми потому, что породы, слагающие их в разных местах похожи, то мы должны и корреляционную линию проводить по тем местам карты, в которых минимально различие между сравниваемыми скважинами (линию корреляции необходимо провести по тальвегам на карте различия). Это требование можно сформулировать как задачу оптимизации. То есть надо найти нестрого монотонную линию  $L$  на планшете, которая бы соединяла его углы и минимизировала бы некоторый функционал  $\Phi(L)$ . Это оптимизационная задача.*

5. *Далее возникают большие трудности если скважин не две, а много, и они имеют площадное распределение (находятся не на одном профиле). Поскольку при парной корреляции при движении по любому замкнутому контуру (даже из трех скважин) регулярно возникают «невязки» - мы уходим из одной точки, парными корреляциями движемся по замкнутому контуру и приходим на эту же скважину, но уже в другую точку. Избавиться от этих невязок довольно сложная задача и существуют некоторые подходы к её решению.*
6. *Автор предложил аналог парной корреляции, но с многомерной мерой различия. То есть, когда на очередном шаге построения корреляционной модели, некоторую скважину добавляем в существующее решение, можем вычислять меру различия не двух скважин, а конкретно различие между той, которую добавляем и всей совокупностью связанных с ней соседством скважин, для которых корреляционное решение уже получено. Таким образом решается проблема борьбы с невязками – их просто не возникает. Мы добавляем очередную скважину с учетом похожести на всю совокупность её окружения.*
7. *Использование многомерной меры различия в задаче корреляции скважин – первое защищаемое положение работы.*

При создании пространственных моделей осадочных бассейнов, их частей или отдельных месторождений нефти и газа, решающее значение имеет правильность определения стратиграфического соответствия различных тел, выделенных в разрезах скважин. Задачу стратиграфии можно рассматривать, как создание топологической модели геологической среды [Салин, 1979] - своего рода каркас, на который в дальнейшем нанизываются уточняющие его дополнения в виде схем дизъюнктивных нарушений, структурных карт, геологических разрезов, карт толщин, моделей пространственного распределения литологических типов пород и распределения их химических и физических свойств. Традиционные методы стратиграфии, основанные на изучении палеонтологических остатков слоев, их литологического состава, хотя и не утратили своего значения, но все более замещаются методами геофизического исследования скважин и сейсмического изучения территорий. Особенно это характерно для закрытых территорий, где основную информацию об осадочных толщах поставляют каротажные данные скважин и результаты сейсморазведки [Киричкова и др. 2007].

Широкое развитие косвенных методов стратиграфии, основанных на непрерывном прослеживании геологической среды привело к созданию новых направлений этой науки – сеймостратиграфия [Сейсмическая стратиграфия, 1982; Гладенков, 1984; Шлезингер, 1998] и сиквенстная стратиграфия [Маргулис, 2008]. Для этих направлений, изначально основанных на использовании цифровых геофизических данных, предлагается широкий выбор компьютерных технологий, встроенных в интегрированные системы геологического моделирования таких как GeoFrame, Petrel Schlumberger [Schlumberger 2012a, b], RMS Roxar [Emerson. Irap RMS. 2012], MultiLog ПАНГЕЯ [Пангея, 2012], Target Geosoft [Geosoft Inc. 2012], DV Geo ЦГЭ [Ковалевский, Гогоненков, Перепечкин, 2007; Ковалевский, Гогоненков, Перепечкин, 2012] и ряд других. Большая часть реализованных технологических решений, дает интерпретатору инструментарий для стратиграфических построений. Этот инструментарий обладает широкими возможностями обработки и визуализации скважинных данных. Однако, выбор варианта корреляции, собственно идентификация пластов и границ в разных скважинах – прерогатива специалиста и зависит от его установок, опыта, «искусства чтения» каротажных кривых и умения «привязать» эти кривые к сейсмическим данным. Если число скважин на месторождении, исчисляется десятками или сотнями, то построение детальной корреляционной модели, даже в такой инструментальной среде, становится задачей весьма трудоемкой, требующей многодневных усилий опытного специалиста. Для некоторых же объектов число скважин, которые следовало бы учитывать при стратиграфическом моделировании слишком велико и может достигать тысяч, (реальные проекты по Самотлорскому месторождению, например, включают более 20000 скважин). Даже если вся исходная информация доступна и содержится в удобной базе данных, такое число скважин просто физически невозможно отобразить на одном планшете пользуясь индустриальными программными продуктами. Решения же по ограниченной совокупности скважин, например, сгруппированным по нескольким опорным разрезам, могут оказаться не полными и недостаточно точными для построения на их основе детальных моделей залежей. В этой связи, особую значимость приобретает разработка эффективных компьютерных технологий именно принятия стратиграфических решений.

## 2.1 Геологические основы автоматической корреляции разрезов скважин

Насколько соответствуют распространенные математические приемы при решении корреляционных задач геологическим представлениям, и на каких геологических моделях они базируются?

### 2.1.1 Корреляция тел, границ, произвольных точек разреза

Стратиграфия геологам предоставляет инструмент – линейку с рисками для измерения геологического времени. Фундаментальной проблемой этой науки является именно установление рисков данной линейки. Этот приоритет особенно четко проявился за последние два десятилетия, когда энтузиазм мирового стратиграфического сообщества сосредоточился на заколачивании «золотых гвоздей» в границы разных ярусов и систем. Когда вбивается очередной «гвоздь» в основание некоторого яруса это означает (и специально подчеркивается), что данная риска является и кровлей предыдущего яруса. Поэтому, для глобальной стратиграфии задачи выделения границ или тел эквивалентны. Это же справедливо и для формальных постановок, с привлечением математических методов корреляции тел или границ. Другая ситуация складывается при непрерывном сопоставлении всего интервала разреза, когда каждая точка находит аналог в точке или интервале соседнего разреза. При сопоставлении по отдельным границам или телам последовательно решается набор задач выбора аналога или распознавания, а при построении непрерывной модели все значения глубин двух сравниваемых разрезов находят взаимное отображение и решается одна оптимизационная задача.

Предпочтительность того или другого подхода, в значительной степени зависит от конкретной ситуации. Последовательная корреляция по отдельным границам или телам в традиционном понимании, это построение модели с использованием опорных горизонтов и, главное условие для применения этого способа - наличие таких горизонтов. Опорными горизонтами могут быть слои туфов, бентонитов или узнаваемых литологических разновидностей, связанных с быстрым изменением условий осадконакопления, например, в результате резкого эвстатического изменения уровня моря. Методы корреляции оптимальным сопоставлением всего комплекса отложений, также находят аналоги в традиционных приемах стратиграфии при выделении и сопоставлению

однонаправленно изменяемых серий слоев – трансгрессивных и регрессивных комплексов отложений. Такие решения имеют содержательные аналоги в цикло-стратиграфических и сиквенст-стратиграфических построениях.

### **2.1.2 Используемые данные**

Решение задачи сопоставления разрезов скважин может основываться на любых наблюдениях и измерениях, которые допускают представление, как некоторый вид каротажа. Это относится не только первичным измерениям, но и к любым результатам их обработки и интерпретации, например, модели объемных долей вещественного состава отложений и их отдельных компонент. Безусловно, полезным является привлечение сейсмических данных (в рамках принятых моделей соотношения глубины, времени и скоростей). Ценность использования сейсмической информации при построении корреляционных моделей иногда подвергается сомнению на том основании, что скважинные данные намного точнее – каротаж обычно измеряется с шагом в десятки сантиметров, в то время как разрешающая способность сейсморазведки выражается первыми метрами и десятками метров, в зависимости от сложности и физических параметров среды. Однако, погрешности корреляционных решений, мало зависят от детальности каротажных измерений. Ошибочная идентификация слоев может приводить к погрешностям в десятки и сотни метров, и для того чтобы не допускать подобных ошибок можно успешно использовать результаты сейсморазведки. Для детальной же привязки границ в установленном диапазоне сопоставлений, конечно же, более обоснованным является использование каротажных измерений.

Другой вопрос, который может ставиться и обсуждаться – совместное использование каротажных и палеонтологических наблюдений при построении комплексных литолого-стратиграфических моделей. Но в данной работе эта тема не исследуется, поэтому не буду дальше её развивать, сошлюсь на нашу статью, где принципиальная возможность совместного использования таких данных обсуждается [Лапковский, Истомин, Конторович, 2014].

Достаточно часто, в дискуссиях, о роли каротажных измерений при построении стратиграфических моделей, не явно, предполагается использование только тех значений,

которые получены прямыми измерениями в скважине на кабеле или трубах. Хотя, большую ценность могут иметь преобразованные данные. При этом могут достигаться следующие цели:

1. Избавление от влияния факторов, которые мешают в решении стратиграфических задач: насыщения пласта флюидом, технологические воздействия на измерения (время проведения работ, различия в конструкции скважин, тип бурового раствора и т. п.).
2. Приведение разнородных данных к сопоставимым уровням изменения значений путем нормировки в заданный диапазон, логарифмирования, или с использованием других процедур.
3. Повышение информативности данных, их фильтрация, вычисление огибающих кривых, вычисление спектральных характеристик на основе Фурье или Прони преобразований.
4. Построение комплексных параметров с целью уменьшения количества каротажных графиков, сведение их к минимально допустимому набору независимых и информативных, возможно композитных признаков.
5. Учет априорных представлений о геологической модели строения осадочной толщи, её связи со значениями каротажных кривых и используемыми мерами сходства-различия.

Дополнительно, при наличии качественной скоростной модели, из сейсмических данных в виде каротажных кривых могут извлекаться амплитудные, фазовые, частотные и энергетические характеристики волнового поля.

Следует заметить, что и геохимические в том числе и изотопные графики могут с успехом использоваться в автоматических системах построения корреляционных моделей, поскольку при традиционных стратиграфических исследованиях они успешно привлекаются [Pearce et set., 1999].

## 2.2 Математические основы корреляции разрезов скважин

Одной из областей геологии, в которой математические методы стали использоваться достаточно давно, является описание периодических (циклических) процессов осадкообразования. Цикличность осадкообразования, никогда не подвергалась сомнению. Собственно говоря, этот феномен является отражением цикличности мира как такового. Представления о цикличности (повторяемости) мира существовали, возможно, еще в доцивилизационные времена. Они отражены в образах искусства первобытного человека, и их можно найти в древнейших эпических сочинениях всех народов. Чего стоит только цитата из Книги Экклезиаста, начинающаяся словами: «*Род приходит, и род уходит...*».

Европейские традиции научного познания восходят к работам античных мыслителей, в которых явно выражено представление о цикличности природы. Левкипп и Демокрит в этом контексте говорили о вихрях атомов [Лурье, 1970]. Платон развивал представления о симметрии мира и циклах функционирования государства [Лосев, Тахо-Годи; 2005]. До сих пор, многие обращаются к «методу Платона», основанному на представлении о строгой цикличности и предопределенности, пытаясь предсказать пол будущего ребенка. Аристотель внес значительный вклад в понимание времени в связи с движением, развитием, повторением и периодичностью процессов [Лосев, Тахо-Годи; 1982].

Периодичность геологических явлений отмечалась основателями современной геологии Нильсом Стеноном (*Niels Stensen* на датском), Михаилом Васильевичем Ломоносовым, Георгом Христианом Фюкселем и другими [Фролов, 1998].

Современное понимание седиментационной цикличности в значительной степени сформировалось благодаря работам выдающихся исследователей: G. de Geer [1912], J.M. Weller [1930; 1960], Н.В. Жемчужников [1947; 1955], Н.Б. Вассоевич [1948; 1977], Н.М. Страхов [1949; 1960], Р.Н. Kuenen, С.Л. Migliorini [1950], Л.Б. Рухин [1961], Ю.Н. Карогодин [1974; 1978; 1980; 1990], Ю.Н. Карогодин и Дж. Арментроут [1996], А.А. Трофимук и Ю.Н. Карогодин [1974; 1977]. Однако, более подробно я остановлюсь на тех работах, которые непосредственно обращались к использованию математического аппарата и которые способствовали развитию методов количественного решения стратиграфических задач.



На международном геологическом конгрессе 1910 года в Стокгольме Герольд де Геер [De Geer, 1912] предложил понятие варв (седиментационный слой, сформированный за один год) и метод коннекции для корреляции разрезов ленточных глин, основанный на построении ритмограмм. Идеи, высказанные Де Гирром, были развиты в работах Н.Б. Вассоевича, который использовал построение ритмограмм («флишевых гамма») и метод графической коннекции для определения стратиграфических аналогов в разрозненных, плохо фаунистически охарактеризованных толщах. В классической работе, посвященной изучению флиша различных районов Кавказа [Вассоевич, 1948], были получены корреляционные сопоставления разрезов, отстоящих друг от друга на многие километры<sup>1</sup> и на площади около 500 км<sup>2</sup>. Разработанные в этом и последующих трудах методы, основаны на количественном описании ритмично построенных отложений, имеют выраженные черты формальных математических конструкций. Так Н.Б. Вассоевич [1948, с. 142-144] предлагает в цифровом виде описывать такие характеристики флишевых свит, как средняя мощность флишевого ритма, доля каждого из слоев в нем. Кроме того, предложено использовать выраженную в цифровом виде близость конкретных ритмов к типичному флишу, названную «*флишевая типичность*» или «*флишевость*». Предложенные формулы, вычисления «*флишевости*», являются способом оценки меры сходства для различных флишевых ритмов. Важно то, что для корреляции разобщенных отложений использовались числовые параметры типа меры сходства.

Корреляционные построения с анализом сходство варвов используется для внутриварвенной корреляции разрезов

Формальная мера сходства, основанная на вычислении скользящего коэффициента корреляции фрагментов сравниваемых геологических разрезов скважин, была использована А.Б. Вистелиусом и М.А. Романовой в работе «Красноцветные отложения полуострова Челекен (литостратиграфия и геологическое строение)» вышедшей в 1962 году. Этот метод получил название «метод скользящей корреляции». Он позволил расчленить «немые» тонкослоистые плиоцен-верхнечетвертичные отложения на шесть пачек, идентифицировать эти пачки в исследованной области и создать ее геологическую карту района работ.

---

<sup>1</sup> Данные примеры описаны в разделе работы, посвященных использованию метода коннекции для сопоставления разрезов кемченского флиша, отстоящего один от другого на 12 километров в разделе по коннекции разрезов на площади 500 км<sup>2</sup>.

В 1963 году Б. Жековский [Jekhowsky, 1963] опубликовал статью, в которой нестандартно подошел к построению модели стратиграфической корреляции разрезов скважин. По существу, Б. Жековский несколько расширил метод, использованный А.Б. Вистелиусом и М.А. Романовой, вычисляя скользящие коэффициенты, различия не для одной заданной границы, а для всех пар возможных взаимных соотношений глубин отбора образцов в сравниваемых скважинах.

В основе корреляции Б. Жековским было положено изображение взаимного различия фрагментов разрезов скважин в виде планшета. По одной из осей двумерной системы координат откладывались глубины, измеренные в первой скважине, а по другой – во второй. В каждой из скважин, были отобраны пробы для микрофаунистических определений. Различие (число несовпадающих видов) двух проб из разных скважин выносилось на планшет, и таким образом строилась карта меры различия. Корреляционное решение – есть наклонная (не обязательно прямая) линия, соединяющая области с минимальными значениями функции различия (проходящая через области локальных минимумов, седловые точки и тальвеги). За планшеты подобного вида иногда назывались «планшет Жековского».

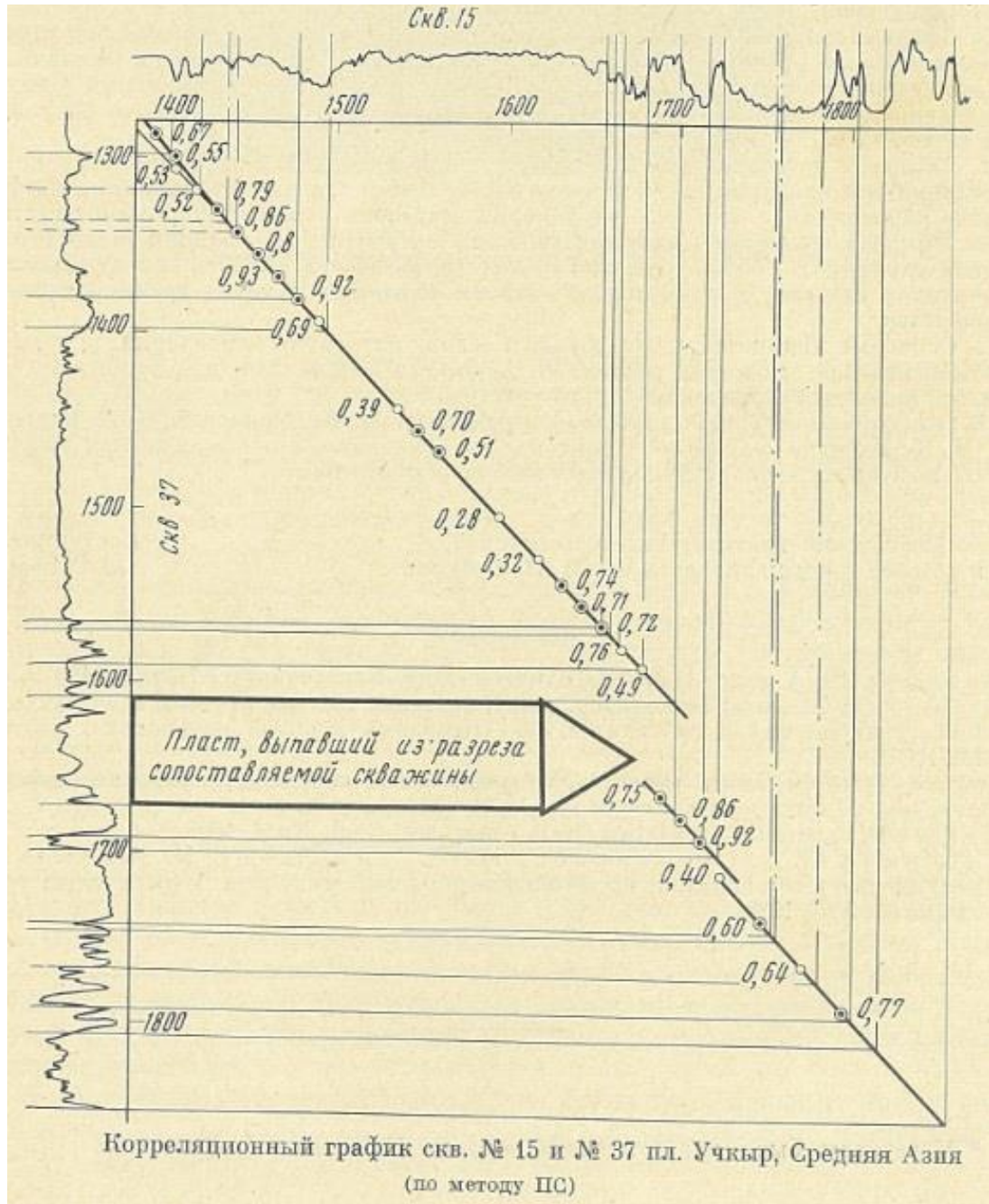


Рисунок 2.1 - Копия рисунка 7 из статьи Ш.А. Губермана и М.И. Овчинниковой, 1972.

Метод, предложенный Жековским не остался незамеченным, он был развит в более поздних публикациях [Губерман, Овчинникова, 1972; Гришкевич 1974; 1977; 1982; 1999; Губерман 2010]. На рисунке 2.1. показан пример из работы Ш.А. Губермана и М.И. Овчинниковой, где на планшете Жековского вынесен результат корреляции двух скважин – 15й и 37й площади Учкыр в Узбекистане по методу ПС. Подобные построения много позднее использованы в работе [Lineman, Mendelson, Toksos, 1987].

Корреляции разрезов скважин на основе поиска оптимальных траекторий на планшете Жековского развивалась в работах В.Ф. Гришкевича. Им в частности предложено рассматривать корреляционную модель для набора из  $n$  скважин как кривую в  $n$ -мерном пространстве («корреляционная кривая») [Гришкевич, 1977; 1984]. Действительно, стратиграфически эквивалентные значения глубин в скважинах образуют вектор из  $n$  значений  $\{x\}$ , то есть одна стратиграфическая граница – это точка  $n$ -мерного пространства. Соответственно, упорядоченный набор границ образует упорядоченный набор точек, которые можно соединить в линии.

С математической точки зрения поиск оптимальной траектории в двумерном поле различия, вычисляемом для сравнения последовательностей слоев близок к методам, применяемым при выявлении схожих геномных цепочек [Панкратов и др., 2012]. При установлении гомогенных цепочек в геномах, биологами с 60-х годов прошлого века использовались матрицы совпадений использовали матрицы совпадений (dot-matrix), ниже приведен пример из работы [Gibbs, McIntyre, 1970] (Рисунок 2.2).

	A	G	C	T	A	G	G	A
G		*				*	*	
A	*				*			*
C			*					
T				*				
A	*				*			*
G		*				*	*	
G		*					*	
C			*					

Рисунок 2.2 Пример матрицы совпадений сравнения двух последовательностей AGCTAGGA и GACTAGGC с общей подпоследовательностью CTAGG (выделенной точками красного цвета). По [Gibbs, McIntyre, 1970].

Для оценки схожести интервалов скважин по графику каротажной кривой обычно используется одна из следующих мер различия-сходства:

$$\Delta = \int_a^b |f_1(x) - f_2(x)| dx \quad (2.1),$$

$$\Delta = \int_a^b [f_1(x) - f_2(x)]^2 dx \quad (2.2),$$

$$K = \frac{\int_a^b f_1(x) \cdot f_2(x) dx}{\|f_1(x)\| \cdot \|f_2(x)\|} \quad (2.3),$$

$$R = \frac{\int_a^b (f_1(x) - \bar{f}_1)(f_2(x) - \bar{f}_2) dx}{\|f_1(x) - \bar{f}_1\| \|f_2(x) - \bar{f}_2\|} \quad (2.4)$$

Здесь  $\|f(x)\|$  - норма функции, в данном случае, вычисленная для интервала [a,b].

$\|f(x)\|^2 = \int_a^b f^2(x)dx$ , а  $\overline{f_1}$  и  $\overline{f_2}$  – средние значения функций  $f_1(x)$  и  $f_2(x)$  на интервале  $[a,b]$ .

Две первые меры – меры расстояния между кривыми они не могут быть отрицательными, третья – нормированное скалярное произведение и четвертая – коэффициент корреляции меняется в интервале  $[-1,1]$ .

Эти меры различия-сходства использовались во многих последующих работах, связанных с автоматизацией процесса корреляции разрезов скважин. В частности, в упомянутой работе Ш.А. Губерман и М.И. Овчинникова [1972], вычислялся нормированное скалярное произведение, то есть мера (2.3).

В системе автоматической корреляции DV Geo ЦГЭ каротажные кривые сравниваются в нормированном виде по сумме модулей их разности, то есть используется нормированная мера (2.1). Некоторые разработчики программного обеспечения автоматической корреляции не указывают явно используемые меры. Это в частности, относится к системе AutoCorr, разработанной в РГУ Нефти и Газа им. И.М. Губкина под руководством И.С. Гутмана [Гутман, Староверов, 2000; Гутман и др., 2006, Гутман и др., 2010].

Другой путь для оценки сходства интервалов разрезов и качества корреляционных решений выбрал В.Ф. Гришкевич. В его работах [Гришкевич, 1974; 1977; 1984; 1999] сравниваются не формы графиков каротажных кривых, а литологические типы, на которые расчленяется разрез благодаря интерпретации каротажных данных. Поскольку большая часть чехла Западной Сибири сложена терригенными породами, то для их идентификации в разрезе хорошие результаты дает метод ПС (метод собственной поляризации). Терригенные типы отложений ранжированы по крупности обломков, от глин (значение признака 1), до конгломератов (значение признака 4). Далее, в качестве меры различия интервалов, используется модуль разности признаков литологических типов. Это близко с оценкой по мере (2.1), но с целочисленными величинами.

Новый аппарат для построения корреляционных моделей предложен Р.А. Шайбаковым [Шайбаков, 2012а, б], для достижения провозглашенной цели – создать корпоративную систему автоматической идентификации пластов НК «Роснефть», автор предлагает использовать технологии обучаемых многослойных нейронных сетей [Рутковская, Пилиньский, Рутковский, 2008]. Пока трудно судить, насколько этот путь плодотворен. Нейронные сети весьма эффективны для задач распознавания. Думаю, что

распознавание литологических и фациальных типов является хорошей задачей для нейронных сетей, а что получится с распознаванием стратиграфического положения слоев - вопрос пока открытый.

Выдвигаются также предложения применять аппарат нечетких множеств при решении стратиграфических задач [Быков, 2009]. По тем материалам, которые опубликованы, можно сделать вывод о близком сходстве данного подхода со стохастическим моделированием осадочных толщ, на основе байесовской статистики и кригинга ошибок.

Автору представляется, что только тот программный продукт, который позволяет специалисту корректировать решения на любой стадии, может рассчитывать на успешную жизнь. Добавлю к этому тезису еще один – на успех может рассчитывать только продукт, интегрированный в промышленные системы построения геологических моделей мировых лидеров.

### **2.3 Корреляционная линия и ее свойства**

На планшете Жековского результат корреляции представляется в виде линии. В.Ф. Гришкевич предложил понятие корреляционной линии, о чем было сказано выше. Решения, которые были получены нами, предполагают определенные геометрические ограничения для корреляционных линий. То есть мы предполагаем, и это реализовано в соответствующих программных решениях, что эта линия не строго монотонна.

Каким геологическим ситуациям соответствует такое предположение?

Если имеется согласная толща слоев без перерывов в осадконакоплении (толщина каждого слоев может варьировать, но везде быть больше нуля), то корреляционная линия для такой толщи будет строго монотонной. Эта ситуация моделируется в рамках рассматриваемого подхода.

Если имеются размывы или перерывы в слоях, а также если имеются разрывные нарушения, приводящие к исчезновению на отдельных участках некоторых слоев (нормальные сбросы, например), то в местах отсутствия слоев корреляционная линия будет не строго монотонной. В ней появляются горизонтальные или вертикальные участки, соответствующие исчезнувшим слоям. И эта ситуация также моделируется.

Две следующие ситуации не могут быть промоделированы в рамках предлагаемого подхода – наличие скважин в зонах надвигов, приводящих к удвоению разреза, и наличие скважин на крыльях опрокинутых складок с неоднократным прохождением части разреза в прямой и обратной последовательности. Точно также не могут быть смоделированы ситуации с субгоризонтальными скважинами, у которых некоторые части разреза повторяются по стволу в прямой и обратной последовательности.

## **2.4 Сопоставление разрезов двух скважин**

Предлагаемые в данной работе методы взаимной корреляции большого числа скважин на разрезах и площадях, основаны на парных сопоставлениях соседних скважин. Данная задача наилучшим образом проработана в области автоматизации стратиграфических решений. Парные сопоставления лежат в основе многих решений, в том числе и наиболее успешного на сегодняшний день - программного продукта AutoCorr [Гутман, Староверов, 2000; Гутман и др., 2006; Гутман и др., 2010].

### **2.4.1 Используемые меры сходства каротажных кривых**

При разработке аппарата сравнения каротажных кривых, мы пытались учесть следующие особенности:

1. Разные скважины могут быть в разной степени охарактеризованы методами каротажа. Необходимо иметь возможность учитывать результаты тех методов, которые выполнены хотя бы в двух скважинах проекта.
2. Традиционная практика интерпретации каротажных данных показывает, что зачастую один выбранный метод, работает недостаточно хорошо, надежные результаты обеспечиваются комплексом методов. Отсюда, должна иметься возможность построения комплексной оценки сходства. Надо иметь возможность взвешенного суммирования оценок, полученными разными методами. Для этого, весьма желательно, чтобы все методы сравнения каротажа генерировали результаты одного порядка. Мы используем меры, которые имеют область значений  $[0,1]$ . При этом 0 – означает отсутствие различий или максимальное сходство, а 1 – максимальное различие.



3. Меры (2.1) и (2.2) близки между собой. Они характеризуют расстояние и его квадрат между кривыми. Мера (2.3) – другого рода, она характеризует близость форм, а не значений кривых. В ряде случаев, кривые имеющие разные значения, но выраженную повторяемость формы, указывают на принадлежность фрагментов разреза к одному стратиграфическому уровню. Это возможно, например, для разных фациальных обстановок накопления осадков, но в которых запечатлелись одни и те же глобальные события, вроде, быстрого изменения уровня моря, появления прослая туфов. Отсюда, необходимо иметь возможность выбора и объединения мер, типа расстояния и типа коэффициента корреляции.
4. В реализованном подходе, сравниваются между собой точки разрезов разных скважин с некоторым шагом разнесенные по глубине. Реально, оценивается различие не точек как таковых, а интервалов, в центре которых находятся точки. Логично допустить, что области окрестностей, вблизи сравниваемых точек были более значимы для получения оценки, нежели расположенные на периферии окна сравнения. Поэтому в окрестностях вычисления вводятся весовые функции, уменьшающиеся от центра к границам окрестности.

#### 2.4.2 Вычисление функции различия для одного вида каротажной кривой

В работе используются два вида меры различия – один определяется как средне взвешенное расстояние между одномерными функциями (каротажными графиками) следующим образом. Пусть  $x_1$  – значения глубины центральной точки фрагмента в первой из сравниваемых скважин, а  $x_2$  – во второй,  $A$  – длина интервала сравнения,  $s$  – переменная, по которой происходит интегрирование в диапазоне от  $-A/2$ , до  $A/2$ , а  $g$  – каротажная кривая, заданная в обеих скважинах и для которой вычисляется мера различия,  $w(s)$  – весовая функция максимальная в центре окон сравнения и уменьшающаяся к границам

$$f_d(x_1, x_2) = \sqrt{\frac{\int_{-A/2}^{A/2} w(s) [(g(x_1+s) - g(x_2+s))]^2 ds}{\int_{-A/2}^{A/2} w(s) ds}}, \quad (2.5)$$

В качестве весовой функции используется функция Гаусса

$$w(s) = e^{-s^2/2\sigma^2} \quad (2.6)$$

с задаваемым внешним параметром -  $\sigma$ .

По существу, это мера  $\Delta^{0.5}$  (формула 2.2), но с введенной весовой функцией.

Другой вид функции различия определяется через взвешенные скользящие коэффициенты корреляции –

$$f_c(x_1, x_2) = \frac{1 - K(g(x_1), g(x_2))}{2}, \quad (2.7).$$

Здесь  $K(g(x_1), g(x_2))$  - вычисленный в интервале от  $-A/2$  до  $+A/2$  относительно точек  $x_1$  и  $x_2$  коэффициент корреляции между каротажными кривыми. При вычислении коэффициента корреляции, также используется взвешивание результатов измерения каротажа по закону (2.6).

Поскольку все кривые до вычисления мер различия нормируются от 0 до 1, то обе эти функции, возвращают значения от 0 (максимальное сходство) до 1 (максимальное различие).

От выбора меры результат корреляции зависит достаточно сильно. На рисунке 2.3 представлены две карты меры различия части разрезов скважин 3 и 4 Сузунской площади Западной Сибири по каротажной кривой – ПС (метод самопроизвольной поляризации). Для меры, основанной на вычислении расстояний (Рисунок 2.3а), относительно однородные участки поля значений имеют более крупные размеры, и они создают выраженную клетчатую структуру. Рисунок 2.3б характеризуется диагональными очертаниями и относительно мелкими аномалиями поля различия. Первый вариант сравнивает фрагменты кривых, по близости значений, а второй вариант - по подобию форм. Поле на рисунке 2.3б в силу диагональной выраженности лучше соответствует представлению о проективной модели корреляции Т.Б. Хейтса [Haites, 1963] с проективно-параллельными поверхностями слоев, идеальным воплощением которой для планшетов данного вида является диагональ.

Представленный на рисунке 2.3 пример весьма характерен – использование мер сходства типа расстояние приводит к конфигурациям поля напоминающим «шотландку» и ей соответствуют оптимальные корреляционные решения, с относительно большим количеством выклинивающихся пластов между сопоставляемыми скважинами.

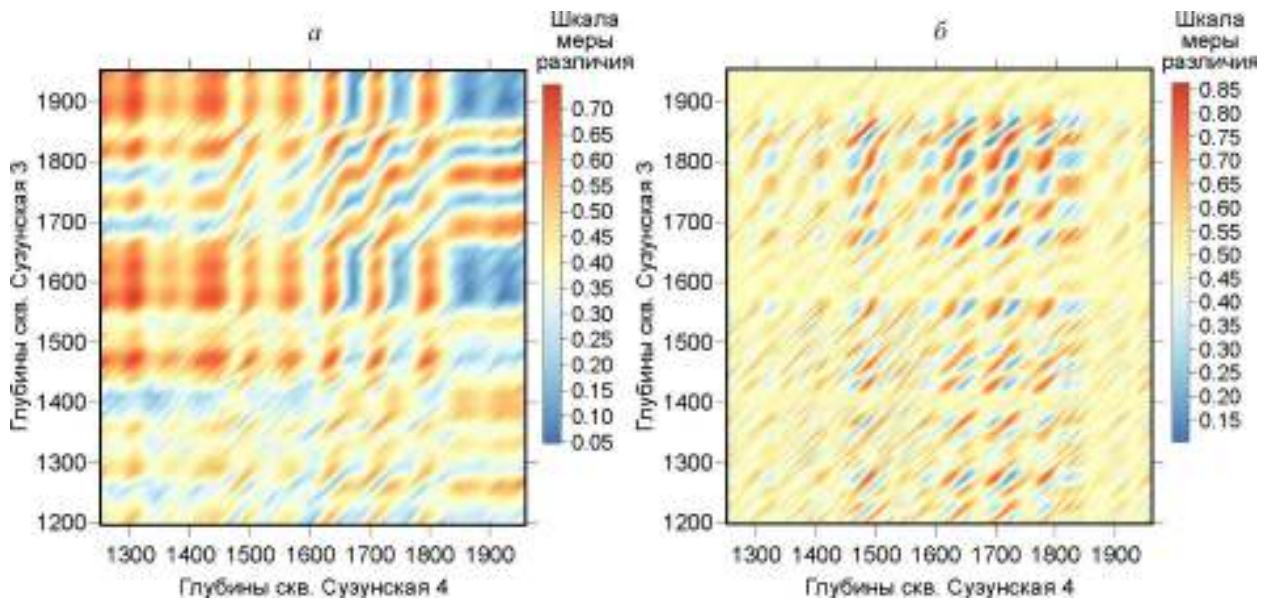


Рисунок 2.3 - Планшеты Жековского, построенные для одних данных, но с разными типами мер различия: а - расстояние между фрагментами графиков каротажных кривых; б - мера, основанная на вычислении скользящего коэффициента корреляции.

#### 2.4.3 Вычисление функции расстояния по нескольким каротажным кривым

Для вычисления карт различия и построения диаграмм Жековского могут быть использованы несколько каротажных кривых. Для этого строятся карты различия по каждой из них, а затем они объединяются. Объединять карты, полученные отдельно для каждого вида каротажного графика можно разными способами. В рамках сложившихся практик они могут быть просуммированы с некоторыми заданными весами [Mirowski et set., 2005]. Другим вариантом является локальный выбор лучшего сходства [Гутман и др. 2006; Методические рекомендации, 2013], при котором высокое сходство по некоторому виду каротажа позволяет считать сравниваемые участки принадлежащими одному пласту и игнорировать различия, наблюдаемые по другим видам каротажа.

При реализации первого подхода задаем веса так, чтобы их сумма равнялась единицы и поскольку каждая из карт имеет диапазон значений от 0 до 1, то и их взвешенная сумма, находится в этом же диапазоне. Использование агрегатов из нескольких функций расстояний оказывается полезным, когда разные каротажные кривые эффективно расчленяют различные части разреза.

## 2.5 Вычисление функции различия одновременно для нескольких скважин

Все корреляционные решения, которые конструируются ниже, получаются на основе умения вычислить многомерную функцию различия для заданного набора глубин любой совокупности скважин. Это принципиальное отличие, предлагаемого подхода от других решений, основанных на построении мер сходства только между парами скважин. Поэтому сделаем короткое, но важное пояснение.

Если имеется от трех и более скважин, расположенных на площади, а не на профиле, то регулярно возникает следующая проблема, при корреляции на основе парных сопоставлений. Имеем некоторую точку с глубиной  $h_1$  в первой скважине, построим корреляционное решение между первой и второй скважиной и выясним, что этой точке во второй скважине соответствует точка с глубиной  $h_2$ . Если далее построим корреляционное решение между второй и третьей скважиной, получим точку с глубиной  $h_3$  в третьей скважине, эквивалентную точке  $h_2$  второй. Далее, если строим модель между третьей и первой скважиной получаем точку с глубиной  $h_4$  в первой скважине, причем, в общем случае  $h_1 \neq h_4$ . При большом числе скважин проблема оказывается достаточно сложной, и требующей специальных приемов решения. На сегодняшний день предложены следующие подходы:

- Скважины коррелируются в автоматическом режиме, а на карте цветом маркируются треугольники существенных невязок, далее в ручном режиме редактируем корреляционные отношения на проблемных участках [Гутман и др., 2006].
- Используем сложную процедуру верификации корреляционных решений по совокупности парных решений в треугольниках окружающих каждую скважину [Ковалевский, Гогоненков Перепечкин, 2018].

Ранее нами предложен подход, идея которого принадлежит автору данной работы, - использовать многомерную меру различия, чтобы избавиться от описанной выше проблемы. Ниже описывается данное решение.

1. Пусть  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  - область евклидова пространства  $E_n$  глубин всех скважин, интервала корреляции. В качестве «каротажных кривых» будем рассматривать ограниченные вещественные функции вида  $g(x) \in C(R^1)$ , где  $x \in R^1$  - любой из видов глубин применяемый для представления скважинных данных. Эти данные могут быть

получены по результатам измерений прибором непосредственно в скважине (на кабеле или обсадных трубах). Кроме того, применимы произвольные преобразования исходного каротажа (например  $v(g(x)) \in C(R^1)$ , где  $x \in R^1$ ), что делает возможным сравнение скважин на основе каротажа, «очищенного» от влияния характера насыщения пласта, технологических факторов, конструкции ствола скважины, времени проведения измерений.

2. Все функции  $g(x) \in C(R^1)$ , используемые для сравнения разрезов скважин, нормируются в диапазоне от 0 до 1 т.е.  $\|g(x)\| \leq 1$  на всем исследуемом интервале. Это дает возможность использовать разные меры различия [Афанасьев, Красавчиков, 1986.], в том числе и включающие взвешенные комбинации результатов измерений по нескольким нормированным каротажным кривым, удовлетворяющих этим условиям.

Если мы имеем вектор глубин  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , который является также и точкой  $n$ -мерного пространства и характеризует возможное положение некоторой стратиграфической границы во всех коррелируемых скважинах, то можем поставить вопрос - как оценить меру близости каротажных данных всех скважин для этой границы? Для простоты предположим, что имеем дело с оценкой только по одному методу каротажа, например, ПС, суть используемого решения от этого не меняется.

1. *Способ правильный, но технически трудно реализуемый.* Для вектора глубин  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  в диапазоне от  $-A/2$ , до  $A/2$ , создадим усредненную каротажную кривую ПС, то есть каждый отсчет этой кривой будет являться средним значением отсчетов на соответствующей глубине во всех скважинах. Далее для всех кривых ПС вычислим их отклонение от осредненной кривой. Тогда, для всех скважин будем иметь набор значений отклонений измеренных значений ПС от осредненной кривой. Дисперсия этого набора отклонений, вполне подходящая величина для оценки многомерного различия всей совокупности скважин в заданных глубинах по графику ПС. Единственное, что не позволяет воспользоваться таким способом, это его нетехнологичность. Его применение потребует для всех используемых комбинаций глубин проводить непростые расчеты с реальными каротажными кривыми.
2. *Способ правильный и технологичный.* Для пар соседних скважин (соседние скважины могут быть соседними в некотором списке, все скважины могут быть

соседями одной – опорной, отношение соседства определяется на основе решения триангуляционной задачи, наконец соседство может определяться объединением этих критериев), мы вычисляем парные меры различия во всем диапазоне интересующих нас глубин. Эти предварительно вычисленные величины, могут быть использованы для оценки меры различия без вычисления средних значений. По существу, такой подход применяется в геостатистике [Дюблор, 2002; Wackernagel, 2003; Caers 2005; Демьянов, Савельева, 2010]. Прямое вычисление дисперсии, а также ковариации и корреляции (без вычисления средних) по набору парных разностей показано в работах В.Л. Чечулина [2010; 2011]. В частности, в теореме 1, для дисперсии, им доказываемся справедливость следующей формулы

$$D_2(X) = \frac{1}{2 \cdot n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (x_i - x_j)^2 \quad (2.8).$$

где  $n$  – число измерений,  $x_i$   $i$ -тое измерение.

Результат (2.8) позволяет ввести несколько видов многомерного расстояния, вычисляемого непосредственно из парных карт различия фрагментов разрезов скважин. В данном случае парные меры различия используются как базис на основании которого вычисляются функции расстояния как линейные или нелинейные меры по этому базису. В частности, мы использовали

$$F_x(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum f(x_i, x_j) w_{ij} \quad (2.9)$$

Здесь  $f(x_i, x_j)$  – все вычисленные функции парных мер различия, а  $w_{ij}$  - индивидуальные веса этих функций.

$$F_x(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sqrt{\sum [f(x_i, x_j) w_{ij}]^2} \quad (2.10)$$

Другая мера, аналог среднегеометрическому, показана ниже

$$F_x(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum w_{ij} \sqrt{\prod w_{ij} \cdot f(x_i, x_j)}, \quad (2.11)$$

С помощью весов, например, можно строить только такие многомерные меры различия, которые характеризуют ситуацию для конкретной скважины и всех ее соседей. Несколько слов о том, как используются формулы (2.10) и (2.11). На некотором шаге задачи присоединяем к общему решению скважину с номером  $k$ . Для базовых функций  $k$ -той скважины со скважинами, которые уже включены в корреляционную модель устанавливаем вес 1, а для всех остальных вес равный 0.

То есть

$$w_{kj} = \begin{cases} 1, & \text{если } j \text{ – скважина уже включена в корреляционную модель,} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

и

$$w_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{если } j \text{ – скважина уже включена в корреляционную модель,} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

Далее с некоторым шагом для всех глубин  $k$ -той скважины, и с шагом по корреляционной модели для комбинаций стратиграфически эквивалентных глубин вычисляется двумерное поле различия по формуле (2.10) или (2.11). То есть имеем двумерный планшет Жековского в котором строим решение для  $k$ -той скважины. Важной чертой такого подхода является то, что получаемое решение учитывает меру различия  $k$ -той скважины со всем своим окружением для которого задача корреляции решена, а не с одной какой-то скважиной. Получаемое таким образом решение не несет «невязок», характерных при использовании парных сопоставлений.

## 2.6 Методы построения корреляционной линии

### 2.6.1 Построения для двух скважин

Данная ситуация возникает, когда решается задача корреляции разрезов двух скважин. Другой случай – когда общее решение по большему числу скважин конструируется на основе предварительно полученных парных корреляций.

Корреляционная линия должна проходить по области минимальных значений функции расстояния рассчитанной для всех возможных сочетаний глубин двух коррелируемых скважин. Эта линия должна минимизировать некоторый функционал, по которому происходит сравнение и оценка вариантов корреляции. В качестве такого функционала мы используем

$$\sum_{i=1}^k f(x_i, y_i) + \beta \sum_{j=1}^n f(x_j, y_j) \rightarrow \min \quad (2.12).$$

Здесь имеется ввиду следующее - линия  $L$  строится в двумерном поле меры различия, которое вычислено на регулярной прямоугольной сети, и она выходит из левого нижнего угла в правый верхний двигаясь по ребрам и диагоналям ячеек сети,  $k$  – число перемещений по вертикальным и горизонтальным ребрам, а индекс  $i$  пробегает по этим

ребрам. Индекс  $j$  – перечисляет все диагональные перемещения в линии  $L$ , а  $\beta$  – число в диапазоне от 1 до 2.

Если  $\beta = 1$ , то функционал (2.12) приобретает вид

$$\sum_L f(x, y) \rightarrow \min \quad (2.13)$$

Здесь  $L$  – линия подлежащая оптимизации, а  $f(x, y)$  – функция различия в точках на этой линии. Если  $\beta = \sqrt{2}$ , то функционал (2.13) приобретает вид

$$\int_L f(x, y) dL \rightarrow \min \quad (2.14)$$

то есть находится линия, у которой минимален интеграл поля различия.

Если  $\beta = 2$ , то оптимальная линия, соединяющая диагональные точки на карте поля различия минимизирует средние значения поля различия, по которым она проходит.

Соответственно минимизируется функционал

$$\frac{1}{P(L)} \int f(x, y) dL \rightarrow \min \quad (2.15)$$

где  $P(L)$  – длина линии  $L$ .

Выражение (2.14) и (2.15) можно свести к одному уравнению с параметром  $\alpha$  от 0 до 1.

$$\left( \frac{\alpha}{P(L)} + 1 - \alpha \right) \int f(x, y) dL \rightarrow \min \quad (2.16)$$

При  $\alpha=0$  минимизируется интеграл функции  $f(x, y)$  по линии  $L$ , а при  $\alpha=1$  минимизируется среднее значение этой функции по  $L$ . При промежуточных значениях  $\alpha$ , ищется линия минимизирующая взвешенную смесь этих двух критериев. Для решений с  $\alpha=0$  характерны более спрямленные (близкие к диагональным) траектории, если  $\alpha=1$ , то решением будет линия, более аккуратно проходящая по областям минимальных значений.

Нахождение линии, удовлетворяющей условию минимизации одного из приведенных функционалов, является задачей выбора оптимальной траектории. Это достаточно сложная задача минимизации многомерной функции (большая размерность обуславливается большим числом отрезков, из которых может состоять линия  $L$ ). Существует несколько алгоритмов для ее приближенного и точного решения. Первоначально мы использовали генетические алгоритмы и алгоритмы «муравьиной колонии» [Dorigo, Maniezzo, Colorni, 1991; Dorigo, 1992]. Также применялся волновой



алгоритм Ли [Lee, 1961]. Все эти решения давали сопоставимые результаты, но скорость вычисления, простота реализации, оказалась лучшей у волнового алгоритма, который закрепился в современной реализации программных продуктов.

При создании многомерной корреляционной линии были опробованы методы, имеющие аналогию с томографическими задачами [Лапковский, 2010], но более успешным оказался подход на основе последовательного оптимального присоединения к полученному ранее решению очередной скважины [Лапковский и др., 2015] в парадигме динамического программирования [Беллман, 1960].

### **2.6.2 Построение корреляционной линии методом оптимального присоединения**

Одна из попыток решения задачи, построение многомерной корреляционной линии, была связана с её нахождением алгоритмом муравьиной колонии непосредственно в многомерном пространстве. Именно с реализацией этой попытки возникла идея конструирования меры различия как многомерной функции, использующей в качестве базиса функции парных различий. В решении задачи в данной постановке возникли непреодолимые трудности – размерность пространства построения корреляционной линии равно числу скважин. Уже для 8-10 скважин при разбиении интервала корреляции на  $n$  фрагментов по каждой из них (характерная величина  $n$  находится от  $10^2$  до  $10^3$ ) получаем размер сетки для классической реализации волнового или муравьиного алгоритма  $n^8-n^{10}$ . Поэтому возможность использования волнового алгоритма не рассматривалась, а алгоритм муравьиной колонии был реализован без сохранения поля феромонов, чтобы не создавать и не хранить сеточные функции неподъемных размеров. В такой реализации, качество работы алгоритма муравьиной колонии оказалось неприемлемым («оптимальный» путь практически не отличался от диагонали в  $n$ -мерном пространстве). От данной идеи пришлось отказаться, но продукт, связанный с попыткой ее реализации, - вычисление меры различия для произвольного вектора глубин всех скважин как многомерной функции, использующей в качестве базиса функции парных различий, оказался весьма продуктивным. Он позволил создать метод оптимального присоединения, который может использовать как алгоритм муравьиной колонии, так и волновой алгоритм.

Оптимизационную задачу для всего множества скважин можно представить в следующем виде:

$$\int_L f(x_1, x_2, \dots, x_n) dL \rightarrow \min \quad (2.17)$$

Однако, поскольку её решение является, в вычислительном плане, крайне ресурсоемко, так как размерность пространства  $E_N$  может достигать нескольких тысяч и такого же порядка может достигать число дискретных измерений в интервале корреляции, то был предложен последовательный метод решения данной задачи. На каждом шаге решается следующая оптимизационная задача:

$$\int_{L^{k+1}} F^{k+1}_x(\bar{x}^k, x_i) dL^{k+1} \rightarrow \min, \quad (2.18)$$

где  $k = \overline{1, N-1}$  – размерность подпространства, совпадающая с номером шага,  $\bar{x}^k$  – вектор скважин, зафиксированных на предыдущем шаге,  $x$  – свободный член,  $L^{k+1}$  – кривая в пространстве  $E_{k+1}$ , являющаяся линией оптимальной корреляции.

Развернутый пример применения данного метода представлен в 7 главе настоящей работы. Здесь только поясняется то, как организован процесс присоединения к решению  $k$ -той скважины. Находятся все ребра графа отношений между скважинами (в частном случае это триангуляционная сеть, соединяющая скважины), которые связывают  $k$ -тую скважину со всеми скважинами из вектора  $\bar{x}^k$ , этим ребрам приписываются значения весов, используемых в одной из формул (2.9-2.11) равные 1, всем другим ребрам графа отношений скважин, приписываются значений равные 0. Далее для глубин  $k$ -той скважины, которые меняются во всем диапазоне интервала корреляции и для согласованных корреляционной моделью на данном шаге глубин всего интервала корреляции скважин, из вектора  $\bar{x}^k$  вычисляются значения многомерной меры различия и заполняется двумерное поле значений этой меры. Затем в данном поле отыскивается оптимальная линия, которая присоединяет  $k$ -тую скважину к имеющемуся решению. Основное достоинство данного подхода, которое и сформулировано в качестве 1-го защищаемого положения, состоит в том, что скважина присоединяется не на основании её сопоставления с одним из своих соседей, а на основании оптимального решения со всеми своими соседями, для которых была решена задача корреляции на предыдущих

этапах. При этом невязки корреляции на треугольниках – проблеме, которая возникает при использовании только парных сопоставлений скважин не возникает - рисунок 2.4.

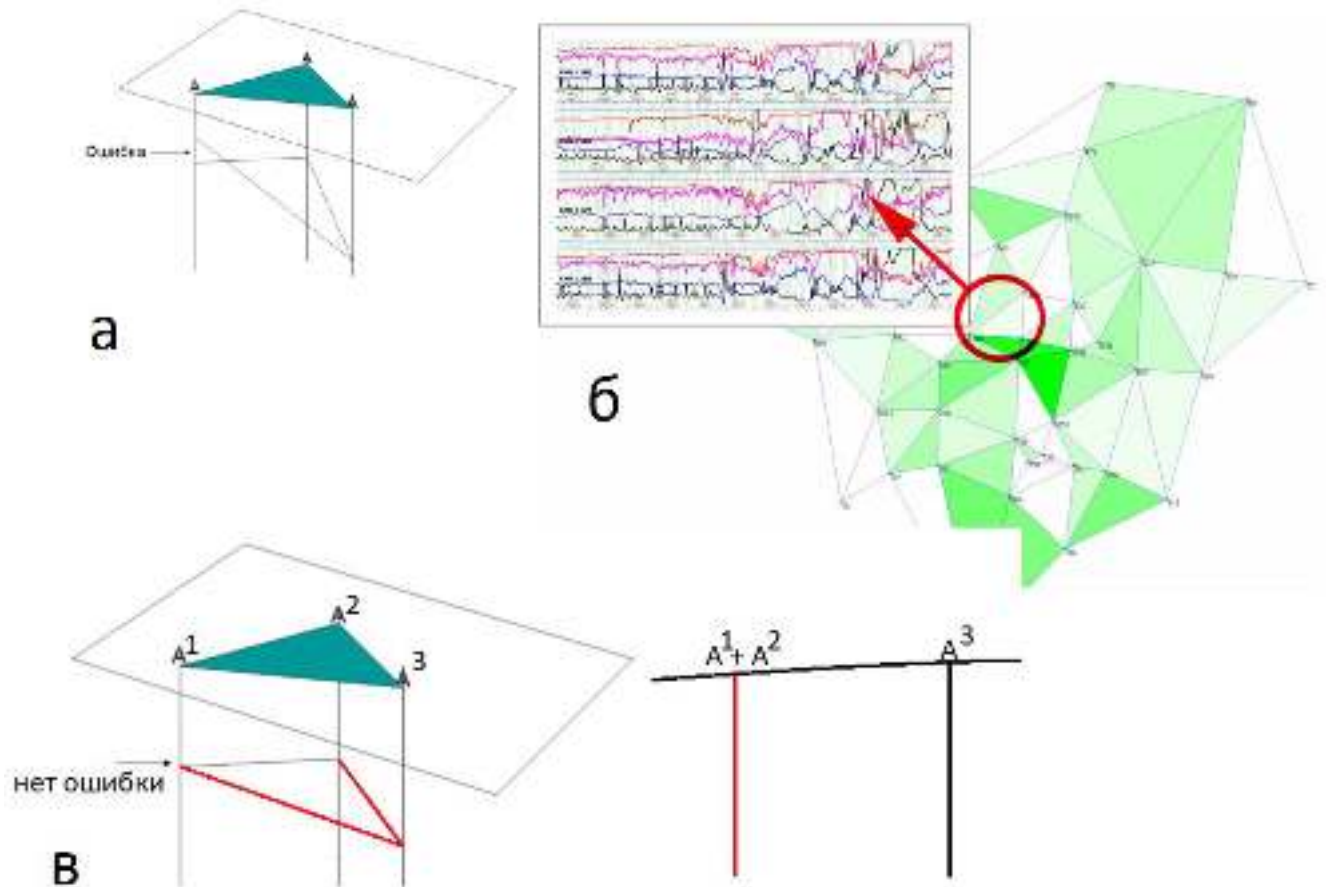


Рисунок 2.4 Достоинство использования корреляции с многомерной мерой различия:

а – ошибка, возникающая при использовании парных корреляций на треугольниках (по [Гутман и др., 2005]); б – интенсивностью зеленого цвета показаны треугольники, на которых выявлены значимые ошибки корреляции по некоторому уровню (по [Кашик и др., 2010]); в – предлагаемое решение – очередная скважина присоединяется к имеющейся корреляции не на основе парного сопоставления с каждой из скважин, а на основе сопоставления присоединяемой скважины и её откоррелированного окружения на основе вычисления многомерной меры различия.

## 2.7 Контроль качества полученных решений и их редактирование корреляционных моделей

Как показывает опыт, практически невозможно создать полностью автоматизированную систему, решающую задачи стратиграфической корреляции на

достаточно высоком уровне. На это указывалось в докладе на ежегодном Санкт-Петербургском энергетическом форуме, представленном коллективом двух ведущих команд в области компьютерной корреляции (РГУ НГ им. И.М. Губкина и ЦГЭ) [Кашик и др., 2010]. Выход из этой ситуации, авторам видится в создании инструментальной среды, в которой специалист может исправлять ошибки и редактировать корреляционные построения в проблемных местах, и в реализованных нами продуктах такие возможности имеются. Для контроля качества, помимо визуального анализа корреляционных схем, мы используем построение карт толщин и карт параметров. Полезным также является анализ карт, средних значений каротажного параметра (например, среднего альфа-ПС), для заданного стратиграфического диапазона. Особое внимание, естественно, следует уделять областям с аномальными значениями мощностей и каротажных параметров. Исправить ошибки в корреляции можно, либо или путем ввода корректных (с точки зрения интерпретатора) глубин корреляционного маркера для любой скважины, либо путем буксировки этого маркера в графическом редакторе каротажных схем (такая возможность реализована в плагине для Petrel Schlumberger).

## **2.8 Факторы, влияющие на результаты корреляции**

Теперь о том, что влияет на результат корреляции. По моему опыту в порядке убывания значения влияют:

1. Выбор каротажных кривых, которые участвуют в вычислении меры различия (то есть это веса кривых, если какая-то кривая не используется, можно считать, что она имеет нулевой вес).
2. Выбор меры различия для каротажных кривых, формулы (2.5) или (2.7). На рисунке 2.5 и рисунке 2.6 приведены карты мер различия, соответственно для формул (2.5) и (2.7).

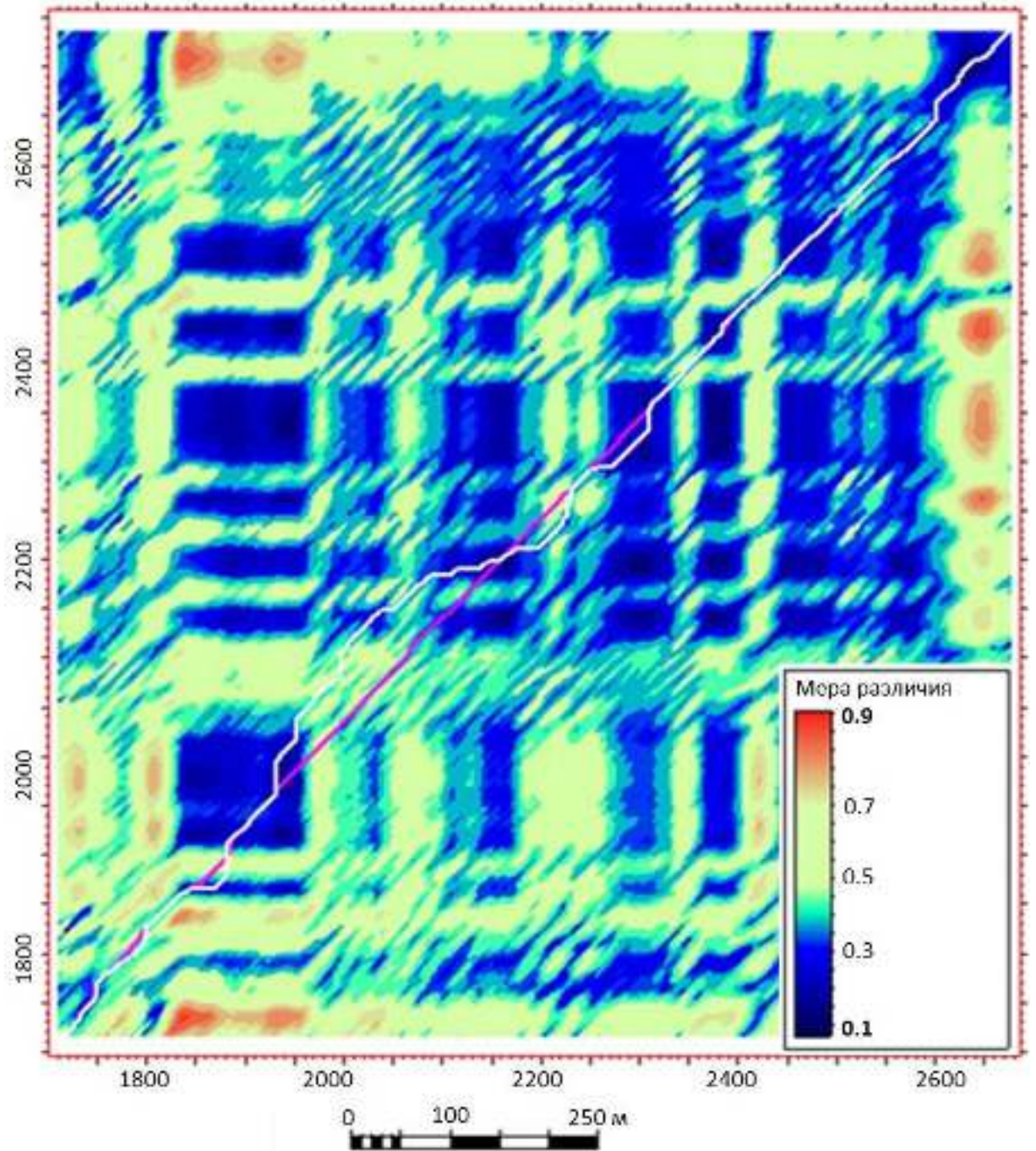


Рисунок 2.5 Карта меры различия по формуле (2.5) скважин well 1 и well 4 по каротажу ПС и две линии оптимальной корреляции для параметра  $\alpha = \sqrt{2}$  условия (2.16) (белая линия), и при минимизации условия (2.13) (розовая линия).

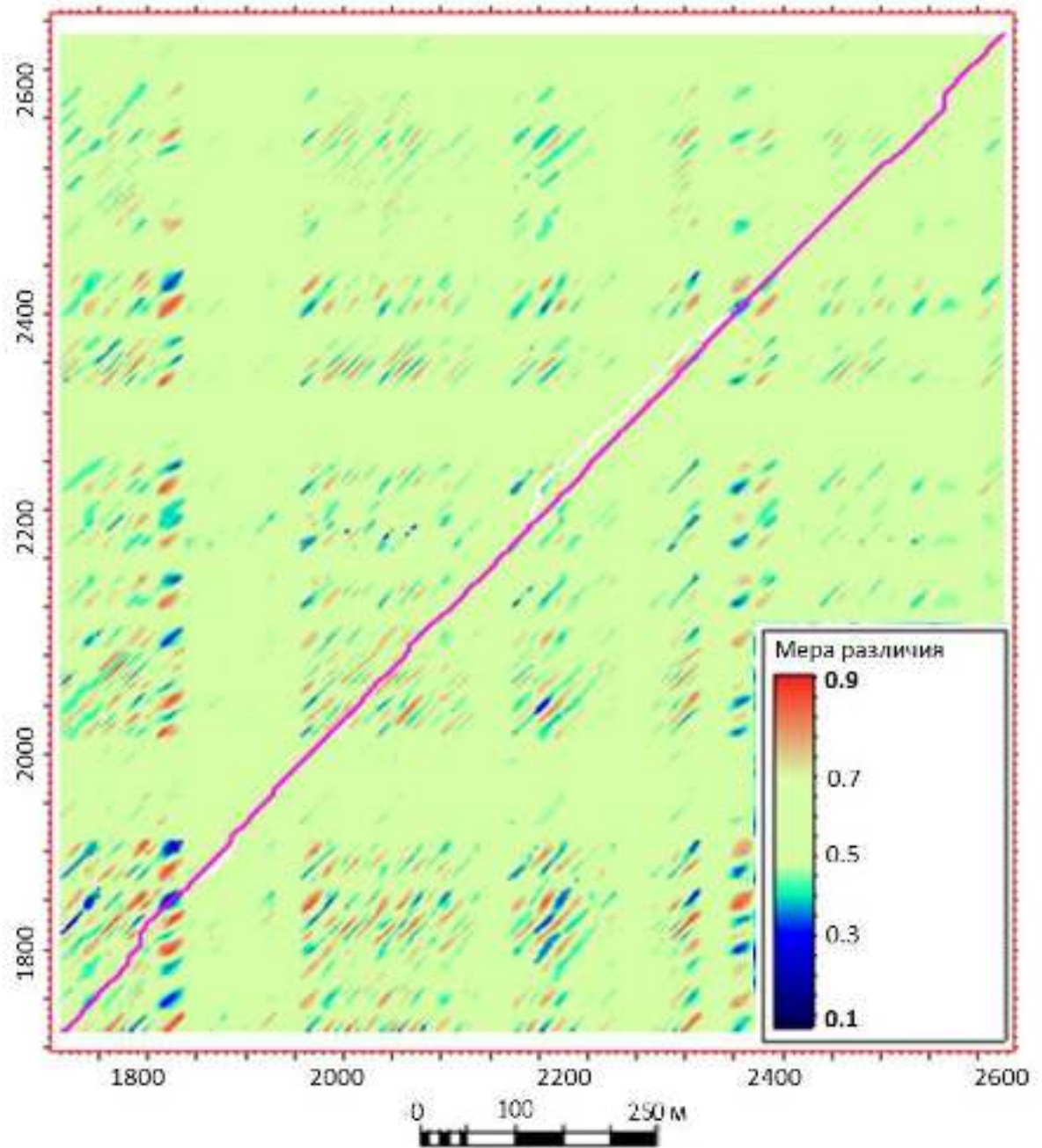


Рисунок 2.6 Карта меры различия по формуле (2.7) скважин well 1 и well 4 по каротажу ПС и две линии оптимальной корреляции для параметра  $\alpha=\sqrt{2}$  условия (2.16) (белая линия), и при минимизации условия (2.13) (розовая линия).

3. Выбор вида минимизируемого функционала и его параметров. На рисунках 2.5 и 2.6, он по-разному задан для розовой линии оптимальной траектории и для белой линии. Этим линиям соответствуют разные модели корреляции. В привычном представлении они показаны на рисунках 2.7-2.10.

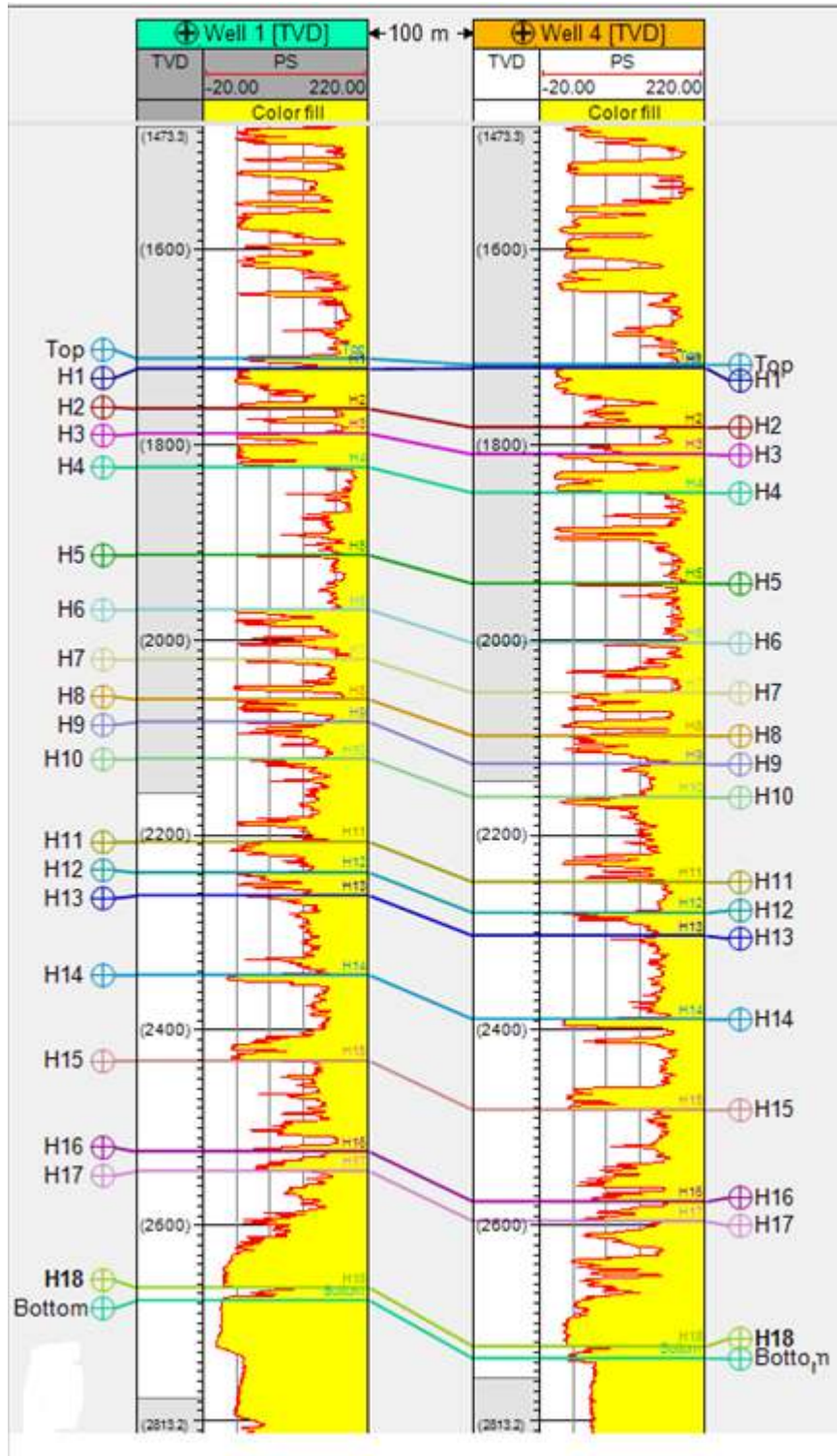


Рисунок 2.7 Корреляционная модель, соответствующая розовой линии на рисунке 2.5.

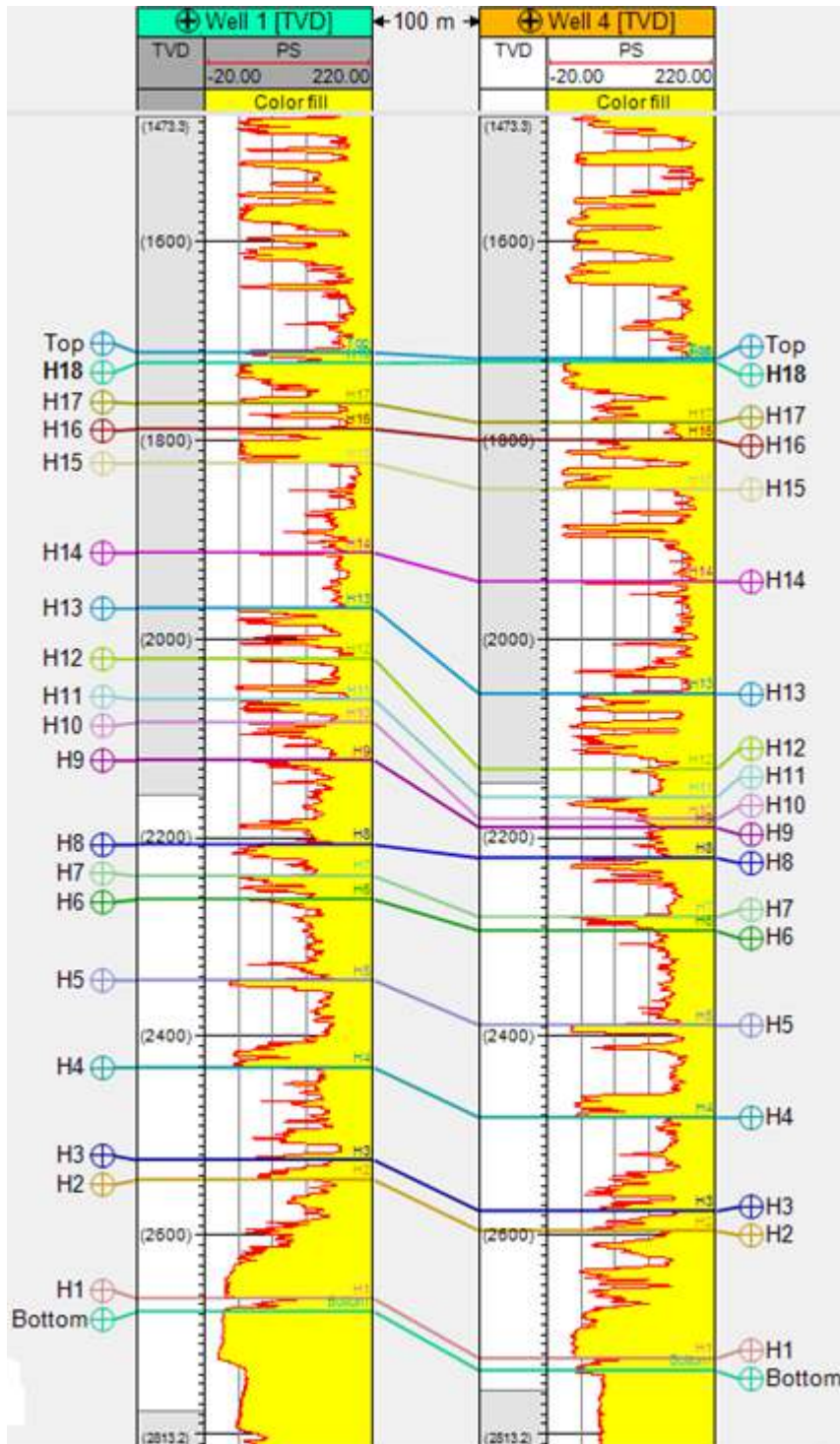


Рисунок 2.8 Корреляционная модель, соответствующая белой линии на рисунке 2.5.



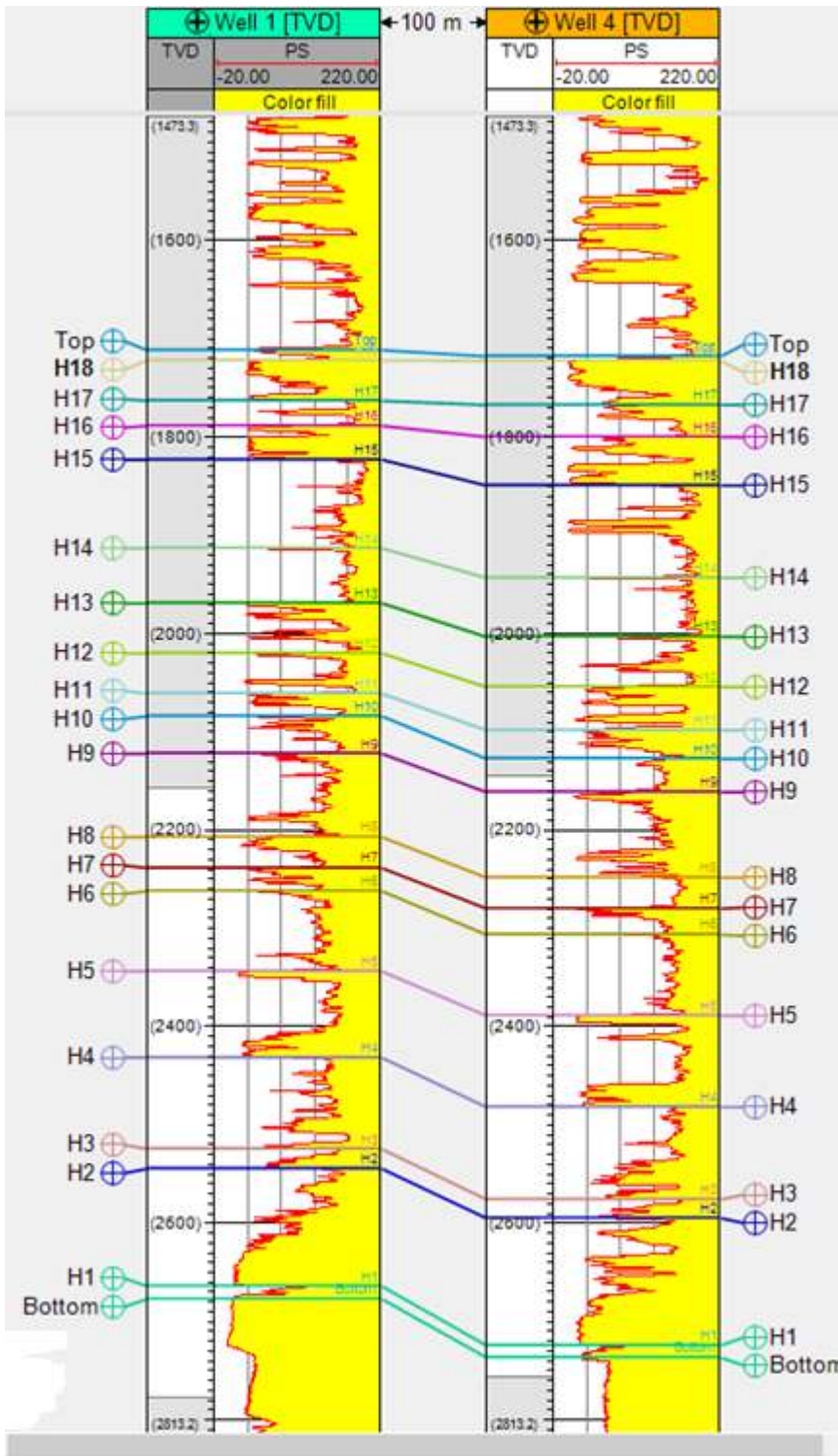


Рисунок 2.9 Корреляционная модель, соответствующая розовой линии на рисунке 2.6.

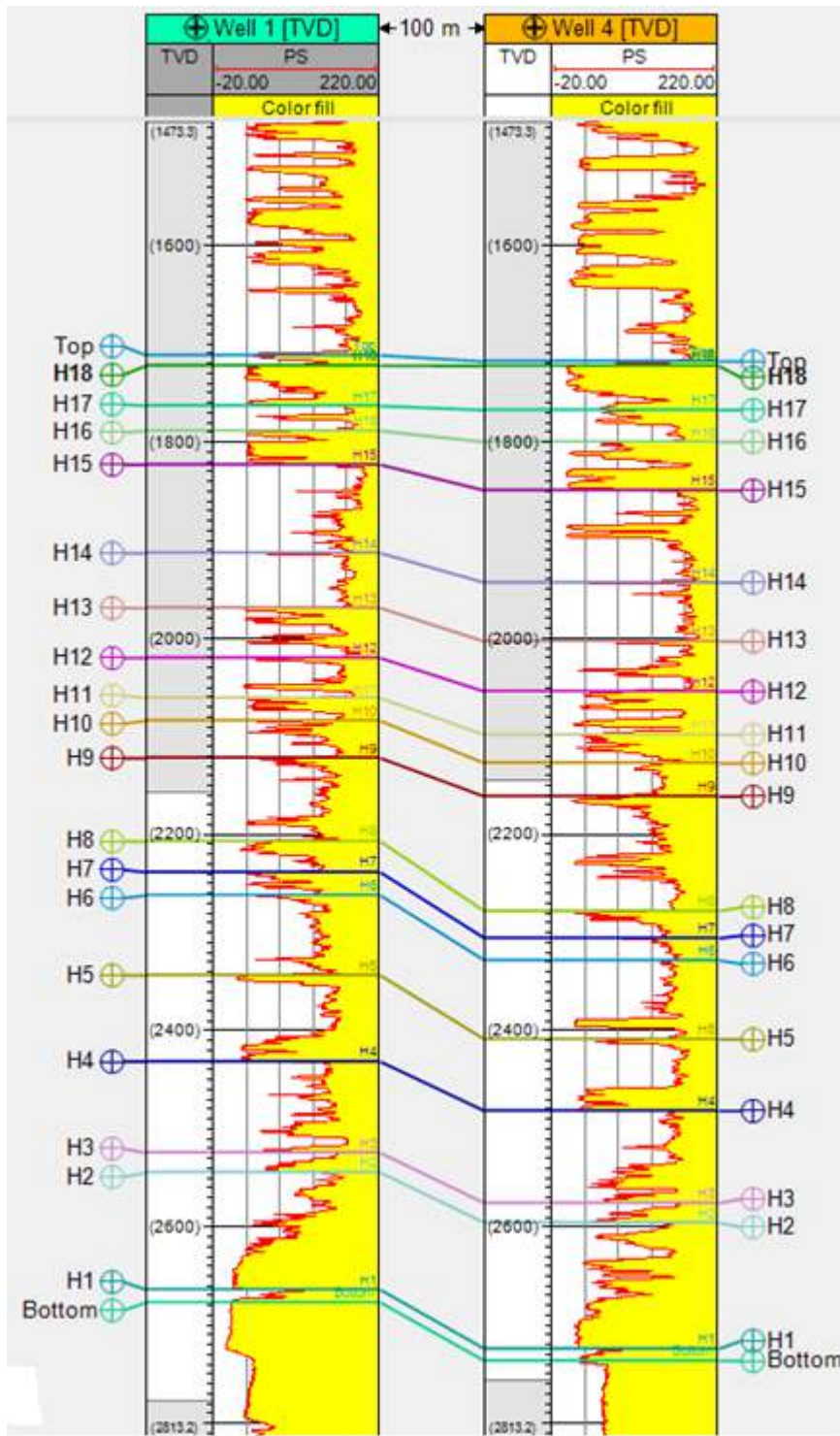


Рисунок 2.10 Корреляционная модель, соответствующая белой линии на рисунке 2.6.

4. Остальные параметры вычисления функции меры различия (ширина окна сравнения каротажных кривых, параметр задающий изменение веса точек при их удалении от центра окна) существенно меньше влияют на результат корреляции.

Представленные на рисунках 2.7 и 2.8 модели несколько различаются, их отличия заметны в проведении горизонтов Н4, Н7 и Н8. Отметим, что все горизонты кроме *top* и *bottom* представленного примера в скважине well 1 были выделены автоматически в соответствии с выражением (2.12).

Единственный способ оценки адекватности установленных параметров, на мой взгляд, - вид корреляционной модели в традиционном представлении. Сложность решаемой задачи в том, что оптимизационное решение неустойчиво. Могут возникать два (или больше двух) существенно разных по форме пути (варианта корреляции) с близкими значениями критерия оптимизации (формулы 2.14). При этом автоматически за «правильный» вариант корреляции принимается тот, у которого вычисленное значение формулы (2.14) меньше. Но если мы даже несущественно меняем параметры построения карт, может оказаться, что лучшим будет уже другой путь. Поэтому в программной реализации метода корреляции пользователю дана возможность принудительно указывать точки, через которые должна пройти линия оптимальной корреляции.

На Рисунке 2.11 показана карта меры различия (2.7) и две линии – розовая минимизирует выражение (2.14) при  $\alpha=0$ , и черная принудительно проведенная через две точки с глубинами:

- 2046м в скважине well 1 и 2022м в скважине well 4 (первая точка),
- 2398м в скважине well 1 и 2267м в скважине well 4 (вторая точка).

Розовая линия соответствует корреляционному решению – рисунок 2.9.

Для черной линии корреляционная модель показана на рисунке 2.12.

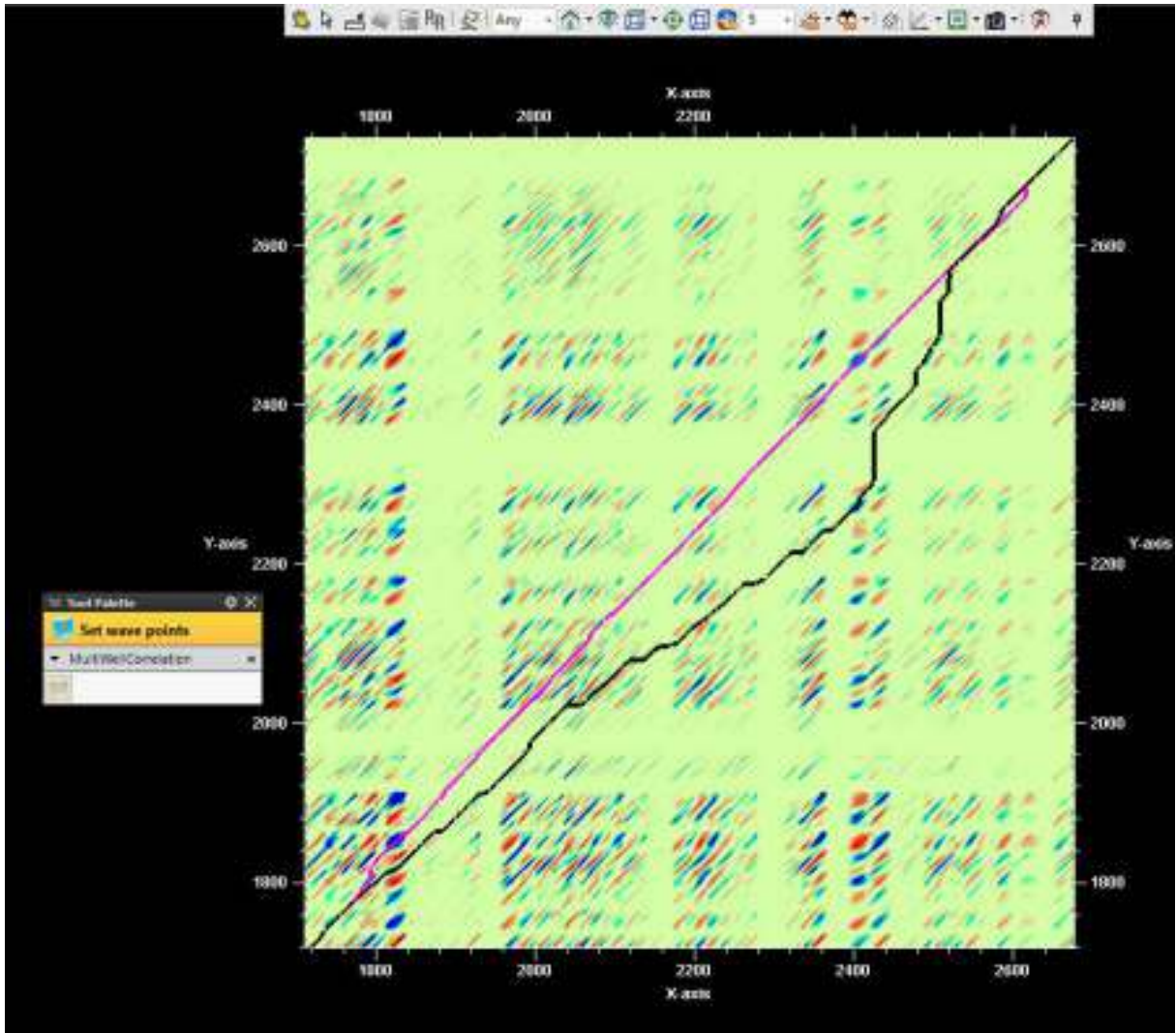


Рисунок 2.11 Карта меры различия и оптимальные линии корреляции – розовая линия, и линия принудительно проведенная через две выбранные точки на карте – черная линия.

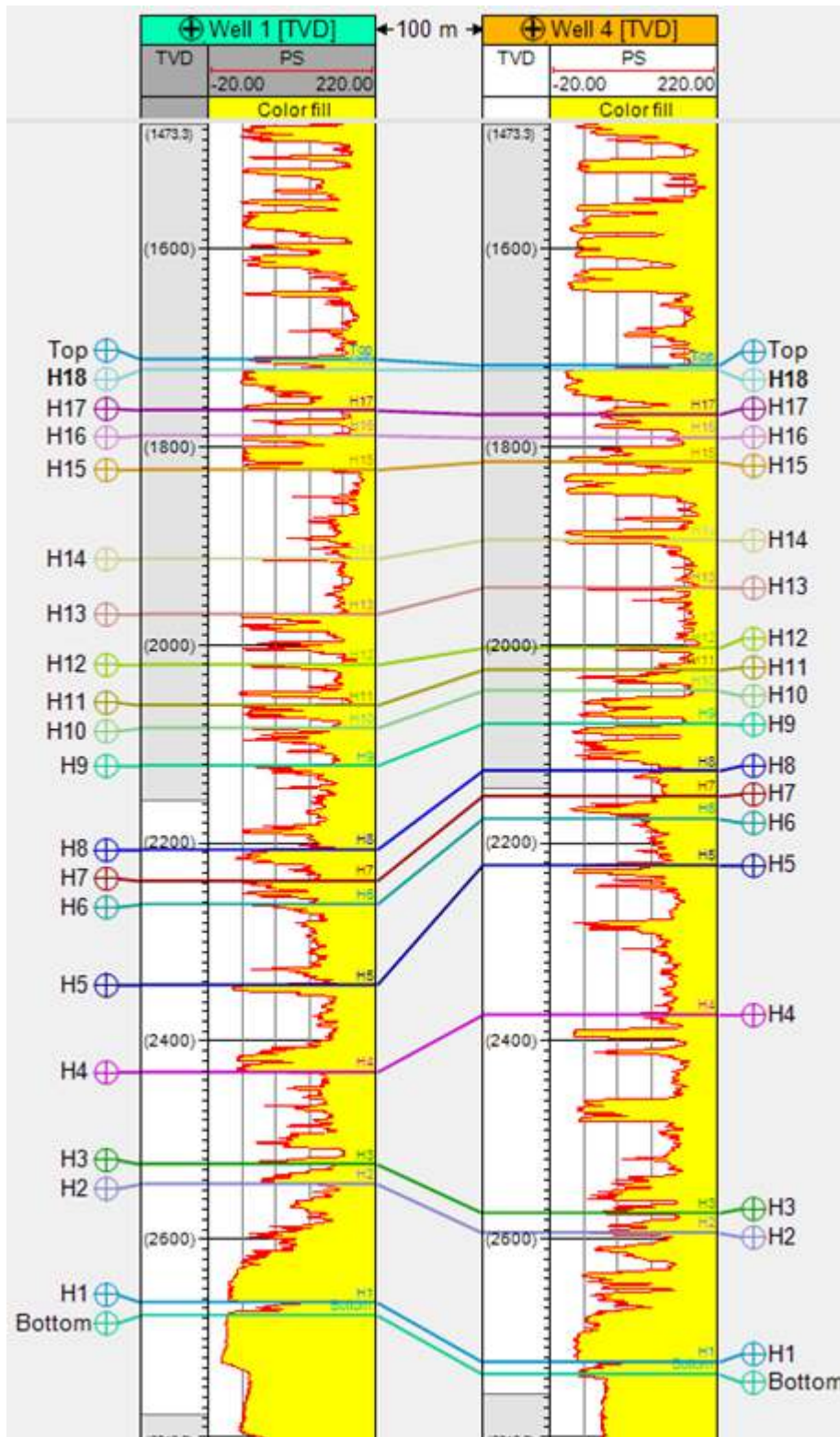


Рисунок 2.12 Корреляционное решение, соответствующее черной линии рисунка 2.11.

## 2.9 Расстановка границ на разрезах скважин

При построении корреляционных схем, традиционно принято выделять реперные стратиграфические границы, которые легко узнаются на соседних скважинах. Так в

терригенных толщах выделяются выдержанные глинистые слои, слои углей, известняков или туфов. Наличие таких тел, характеризующихся устойчивым составом и мощностью, существенно сужает область неопределенности при сопоставлении менее выразительных интервалов разрезов скважин. Одно из реализованных нами решений при построении многомерных корреляционных моделей основано на поиске естественных и наиболее значимых границ по совокупности каротажных кривых. А именно, для кривых вычисляется следующая величина (индикаторная функция):

$$f(i) = \frac{M(F_1) - M(F_2)}{|M(F_1) - M(F_2)|} \left[ M_2(F) - \frac{(M_2(F_1) + M_2(F_2))}{2} \right] \quad (2.19)$$

Здесь  $F$  - вся совокупность результатов каротажных измерений интервала оцениваемой точки,  $F_1$  - измерения, расположенные в данном интервале выше по стволу скважины оцениваемой точки,  $F_2$  - измерения, расположенные в данном интервале ниже по стволу скважины.  $M$  и  $M_2$  – математическое ожидание и дисперсия переменных. Если для решения задачи корреляции, и соответственно, выделения границ пластов используется несколько каротажных кривых, то полученные оценки  $f(i)$  для каждой из них суммируются с установленными весами. Эта технология выделения границ пластов описана в работе [Бердов, Власов, Лапковский, 2012] и реализованы в программном продукте GISWell, а также средствами среды Ocean в виде плагина для Petrel Schlumberger. Помимо выделения пластов, данная процедура полезна и для контроля качества каротажа, в интегрированной среде обработки и визуализации скважинных данных GISWell она служит для поиска ошибок оцифровки и ввода данных. На рисунке 2.12 красным цветом показана исходная каротажная кривая ПС и, построенная на ее основе индикаторная кривая (черная), позволяющая по значениям своих экстремумов расчленить разрез скважины на относительно однородные (по скользящей величине дисперсии) слои. Эти слои обособлены достаточно выразительными границами, которые могут являться первоочередными объектами идентификации в стратиграфической модели.

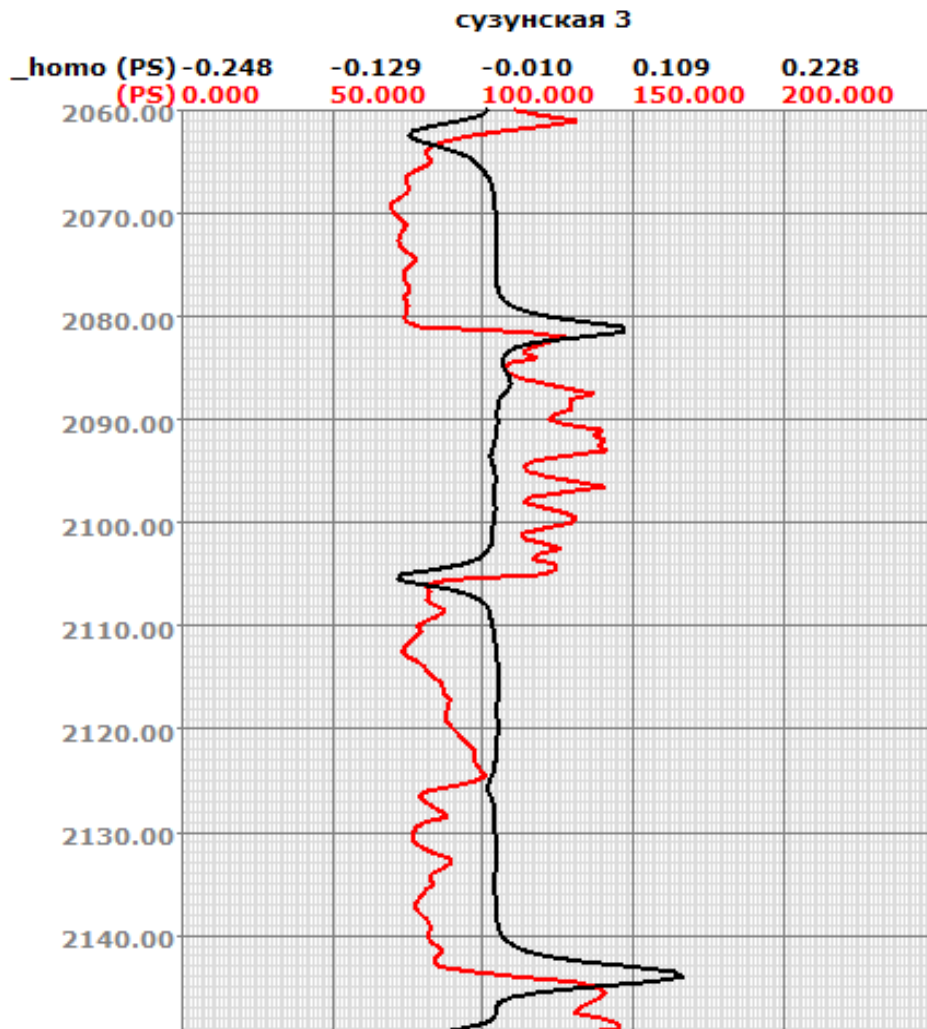


Рисунок 2.13 Индикаторная функция для расстановки границ в разрезе скважины.

**Выводы:**

1. Выполнение стратиграфической корреляции разрозненных скважин может рассматриваться как решение задачи многомерной оптимизации, а именно поиска лучшего пути в многомерном поле функции различия, и решаться методами динамического программирования.
2. Использование многомерной функции различия позволяет избежать возникновения невязок характерных для попарной корреляции скважин.
3. Корреляция скважин по данным ГИС реализована в виде авторских программных продуктов, в том числе совместно со специалистами отделения геофизики ИНГГ СО РАН удалось разработать плагин для интерпретационной среды Petrel Schlumberger.



## ГЛАВА 3 ОБОБЩЕННЫЙ ОБРАЗ СКВАЖИН ПО ДАННЫМ ГИС

*Все обобщения ложны, в том числе это.*

*Бенджамин Дизраэли*

### 3.1 О методе обобщенного фотопортрета

У знаменитого натуралиста и путешественника Чарльза Дарвина был двоюродный брат Фрэнсис Гальтон, который также оставил заметный след в мировой науке. Его научные интересы были чрезвычайно разнообразны – это исследование человеческого интеллекта, генетики, акустики, дактилоскопии. Ф. Гальтон много сил отдал развитию антропологии, идей селекции и наследовании способностей, применительно к человеку, он предложил термин «евгеника». В работе «Composite portraits» [Galton, 1878] (полный текст можно найти по ссылке <http://www.galton.org/essays/1870-1879/galton-1879-jaigi-composite-portraits.pdf>), Ф. Гальтон сформулировал метод составления обобщенного изображения человеческого лица по многочисленным фотографиям разных людей. Сейчас предложенный Гальтоном подход реализован в программах обработки изображений и широко используется антропологами для визуализации межгрупповых и внутригрупповых особенностей, а также морфологической изменчивости в группах. В статьях по антропологии, можно найти огромное количество обобщенных изображений людей [Перевозчиков, Маурер, 2009; Локк, 2011].

Классическая реализация (с использованием негативов и печатью на светочувствительных материалах) получения обобщенного портрета состоит в трех шагах:

1. Выбираются фотографии людей, сделанные в одном ракурсе, с приблизительно одинаковыми освещенностью и экспонированием.
2. Негативные изображения при печати совмещаются по реперным точкам. Сам Ф. Гальтон использовал совмещение по двум осям: проходящая через зрачки, и ортогональная к первой оси, которая делит расстояние между зрачками пополам.
3. Каждое изображение экспонируется одинаковое время так, чтобы суммарное время экспозиции было бы оптимальным для печати.

В современных компьютерных реализациях для совмещения лиц используются сотни пар точек на изображениях, так Дэвид Перретт с соавторами [Perrett at. al., 1994] совмещали лица по 174 характерным точкам.

Мысленно мы способны создать некий обобщенный образ для групп из любых объектов, например, можем представить образ слона. В компьютерных реализациях получения обобщенных изображений важнейший этап – совмещение отдельных изображений по характерным точкам. Подобные действия можно выполнять не только с изображениями лиц людей, но и с другими объектами. И в отличие от мысленного образа, у нас не возникнет затруднений поделить результаты обобщения. Нами рассматривалось создание обобщенного образа баженовской свита Салымского района на основании каротажных данных. Этот же подход использовался и на примере верхнеюрских отложений Нюрольской впадины, а также в его рамках обсуждаются некоторые конкретные задачи геологического моделирования. Суть подхода состоит в том, что различные скважины совмещаются и масштабируются по результатам автоматической корреляции разрезов ГИС, после чего они суммируются с заданными весами. То есть, если две точки в разных скважинах мы считаем эквивалентными в рамках некоторой корреляционной модели, то по этим точкам происходит совмещение скважин при осреднении их каротажных кривых. И вычислении других осредненных характеристик – положение стратиграфических границ, альтитуда ротора и т. п.

### **3.2 Задачи решаемые на основе создания обобщенной скважины**

Объектом, на котором показываются возможности использования технологии создания обобщенного образа скважин, является разрез верхнеюрских отложения нескольких площадей юго-западной части Нюрольской впадины в Западной Сибири. Его географическое положение показано на рисунке 3.1. Всего нами использованы материалы из базы данных ИНГГ СО РАН по 68 скважинам района. Также было выполнено построение структурных карт для этих отложений с использованием скважинных и сейсмических данных. Нами были обработаны данные следующих видов каротажа: ГК (гамма-каротаж), КС (кажущееся сопротивление), ПС (самопроизвольная поляризация), НГК (нейтронный гамма-каротаж), ИК (индукционный каротаж). Для всех задач,

обсуждаемых ниже, основой служила полученная в соответствии с методом автоматической корреляции разрезов скважин корреляционная модель верхнеюрских отложений.

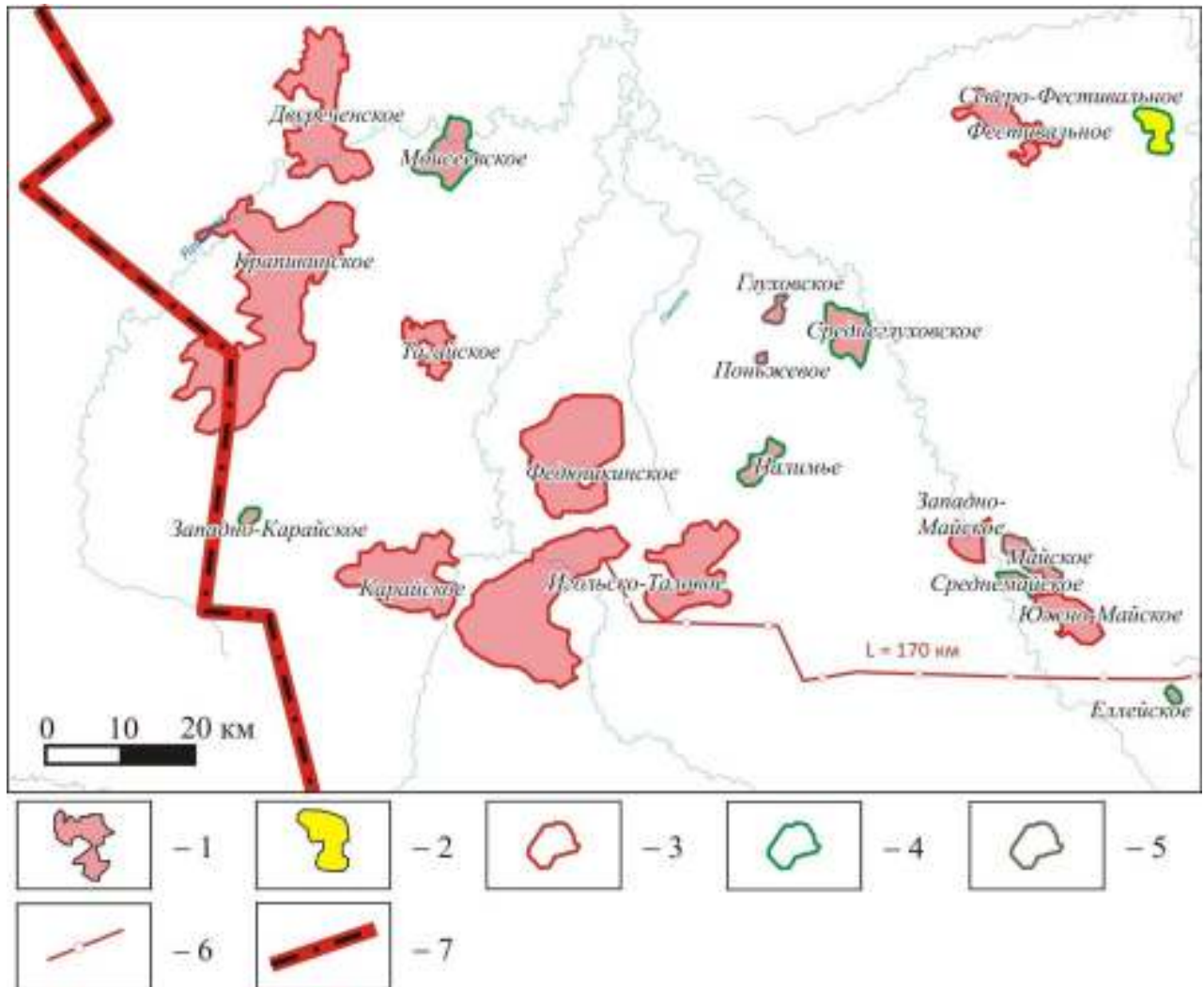


Рисунок 3.1 Месторождения углеводородов в юго-западной части Нюрольской впадины. Условные обозначения: 1 – нефтяные месторождения; 2 – газовые месторождения; 3 – разрабатываемые месторождения; 4 – разведываемые месторождения; 5 – подготовленные к освоению месторождения; 6 – нефтепровод; 7 – административная граница.

- Выявление общих свойств и индивидуальных особенностей поведения каротажных кривых для группы скважин.

На Рисунке 3.2 показаны каротажные диаграммы верхнеюрских отложений четырех скважин Глуховского месторождения, а также обобщенная скважина - правая часть рисунка. Сверху вниз выделены по разрезу кровли следующих свит и пачек: баженовской, георгиевской, васюганской свиты, кровля и подошва углистой пачки, нижеваюганской подсвиты, тюменской свиты. Обобщенная скважина в целом повторяет формы

каротажных кривых объединяемых скважин. Индукционный каротаж, характеризует только две скважины Глуховской площади, anomalно высокие значения индукционного каротажа характерны для георгиевской свиты и связаны с высоким содержанием глауконита в её породах. Эта особенность – соответствие anomalно высоких значений интервалу георгиевской свиты выявляется и на обобщенной скважине. Во всех исходных скважинах, а также в обобщенной, в интервале баженовской свиты anomalно большие значения КС расположены со смещением вниз относительно anomalии ГК.

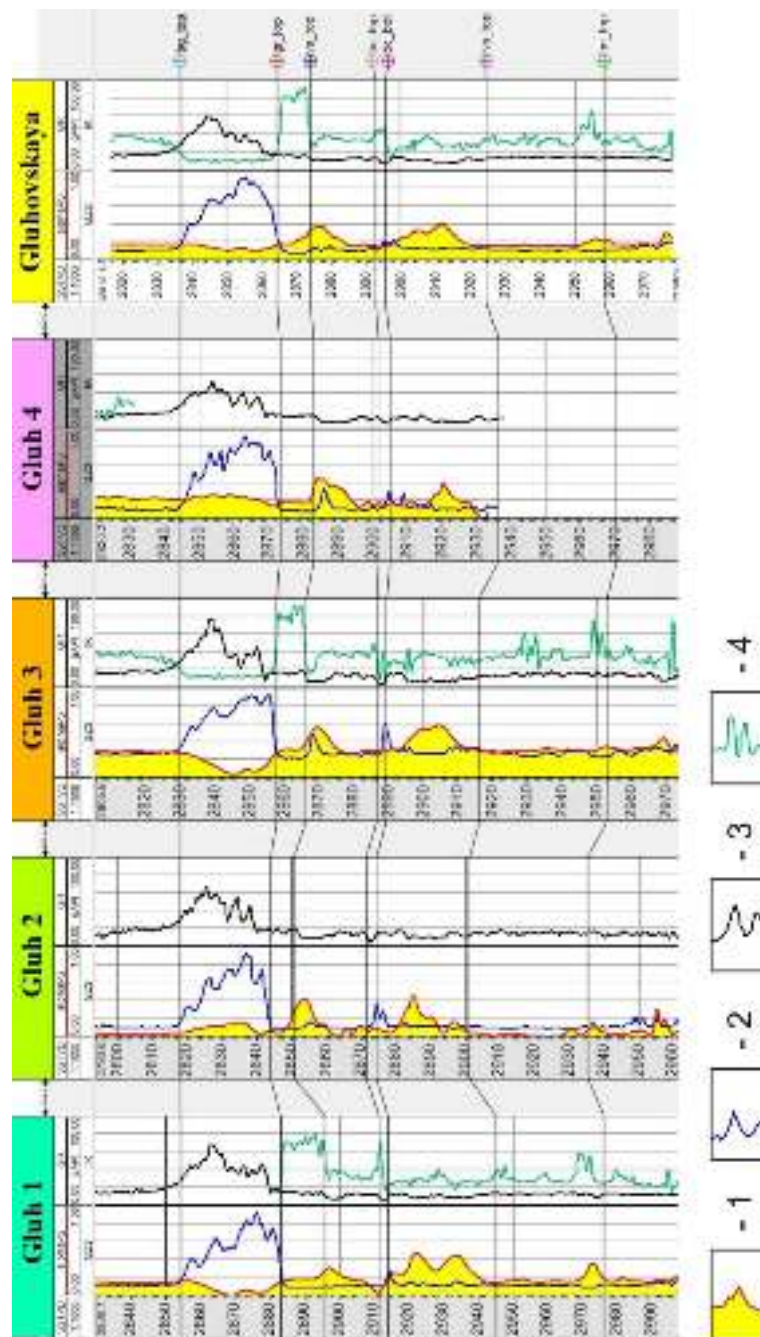


Рисунок 3.2 Каротаж скважин Глуховской площади и полученная для них обобщенная скважина. Условные обозначения: 1 – ПС; 2 – КС; 3 – ГК; 4 – ИК.

На следующем рисунке – 3.3 показаны обобщенные скважины в целом для всей Нюрольской впадины, а также для отдельных площадей. Здесь особенность, отмеченная для Глуховских скважин – смещение аномалии КС ниже по разрезу относительно ГК, присуща для всех площадей, имеющих от четырех и более скважин. Это смещение отмечалось нами для баженовской свиты Салымского района (статья в печати) и, по-видимому, она характерна для центральных и южных районов Западной Сибири в целом. Один из способов анализа изменчивости физических свойств разреза, который использовался автором, является вычисление разности между каротажем скважин (например, обобщенными скважинами для отдельных площадей и для Нюрольской впадины в целом).

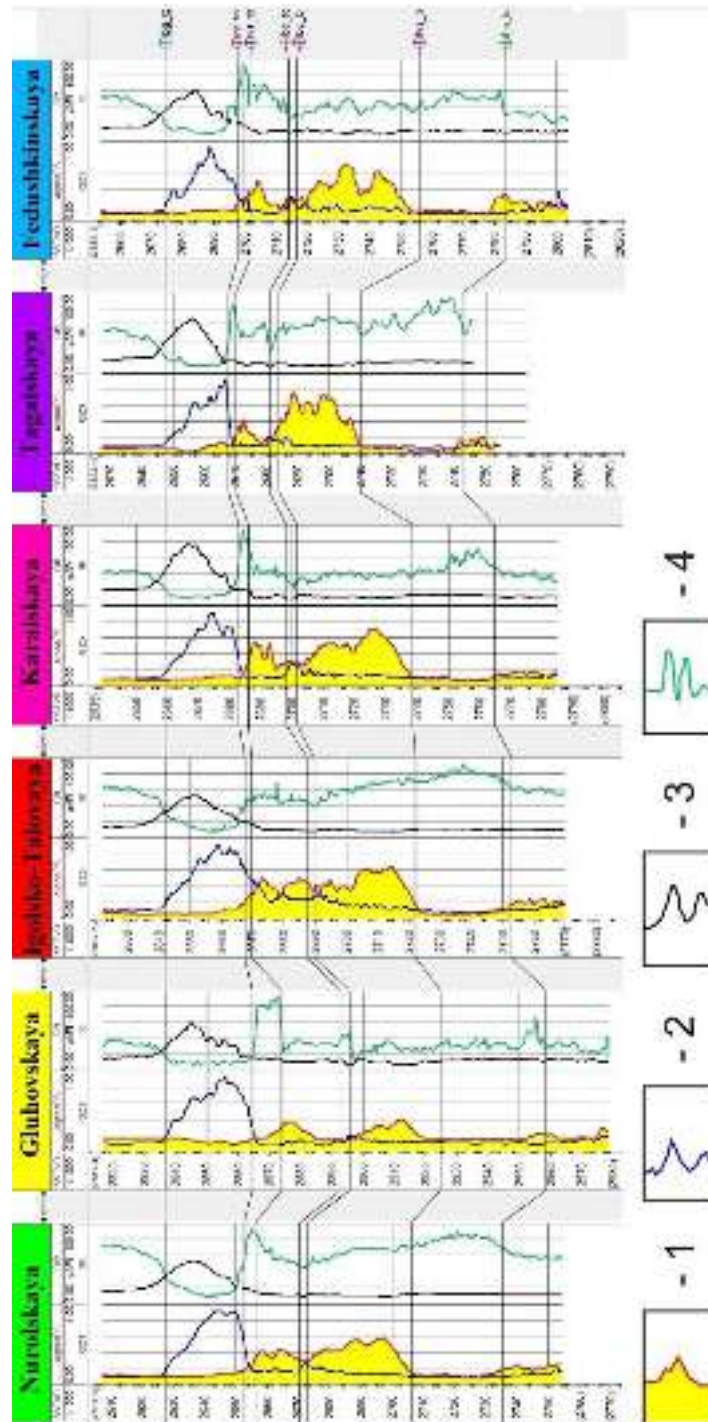


Рисунок 3.3 Обобщенные скважины для Нюрольской впадины в целом (слева) и для её отдельных площадей: Игольско-Таловая, Глуховская, Карайская, Тагайская, Федюшкинская (следующие слева на право).

Условные обозначения: 1 – ПС; 2 – КС; 3 – ГК; 4 – ИК.

- Прогноз значений каротажных диаграмм и литологических и физических свойств проектируемой скважины.

При проектировании и подготовке бурения глубокой скважины необходимо спрогнозировать разрез, который будет ей пройден. Разумным решением представляется

вычисление для точки заложения скважины, её обобщенного образа на основании имеющихся поблизости скважин. Если в предыдущей задаче, при построении образа скважины в Нюрольской впадине, все индивидуальные скважины учитывались с равными весами, то при моделировании образа разреза в конкретной точке, следует учитывать скважины с разными весами, находящиеся на разном расстоянии от этой точки. Функция веса  $i$ -той скважины может быть принята как  $1/r_i$ , или  $1/r_i^2$ , где  $r_i$  – расстояние от точки прогноза до  $i$ -той скважины. Наклонные скважины можем пересчитывать в их вертикальные проекции. Положение отдельных границ, и соответственно, положение максимумов и минимумов каротажных кривых на прогнозной скважине может учитывать имеющиеся по району сейсмические данные.

- Построение трехмерных моделей распределения физических и литологических свойств.

Если мы всю интересующую территорию покроем равномерной прямоугольной сеткой, затем для каждого узла этой сетки будем вычислять обобщенную скважину с учетом расстояний до реальных скважин и их весов. Каждая, полученная таким образом скважина, характеризует вертикальный разрез в конкретной точке с учетом стратиграфических отношений и весов реальных скважин. Соответственно, мы можем на одинаковых глубинах по 3D сетке заполнить все пространство спрогнозированными значениями каротажа. Этот куб, опять же, подобно вычислению прогнозной скважины, может создаваться с корректировкой геометрии по сейсмическим данным. Далее можем вычислить производные свойства, например, если мы знаем регрессионное уравнение для коэффициента пористости от нескольких видов каротажа, мы можем построить куб пористости интересующей области. Нами был выполнен расчет кубов основных видов каротажа и пористости для верхнеюрских отложений юга-запада Нюрольской впадины с учетом сейсмических данных. Насколько известно автору, куб пористости для столь обширной площади был построен впервые. На рисунке 3.4 показаны несколько сечений этого куба.

- Вычисление аномальных (локальных) характеристик разрезов скважин по отношению к фоновым и создание соответствующих трехмерных моделей.

При геофизических исследованиях скважин иногда замеренные наблюдения представляют как сумму фоновой и локальной компонент, то есть выделять аномалии в поведении некоторого параметра на фоне усредненных значений. Это делается, в частности, при исследовании распределения температуры в скважинах и локальные изменения позволяют судить о составе флюидов и их гидродинамическом режиме. Локальные аномалии позволяют, например, четко сформулировать критерии прогноза оруденения по данным каротажа КС и ГК [Глушкова и др., 2016]. При этом обычно в качестве фоновой компоненты выступают осредненные в некотором окне значения соответствующего каротажа в скважине. Это позволяет выделять аномалии по разрезу конкретной скважины. Рассматриваемая нами задача состоит в том, что обобщенную скважину для определенной площади или нескольких площадей можно считать типичным или фоновым объектом, с которым сравниваются конкретные скважины. Для каждой скважины района с учетом установленных стратиграфических отношений в каждой точке ее разреза можем вычислить отклонение значений любого вида каротажа от тех значений, которые характеризуют обобщенную скважину. Таким образом не только по разрезу, но и по площади вычисляются аномальные (локальные) по отношению к фоновым, значения каротажных измерений. То есть, для каждого стратиграфического уровня – набора стратиграфически эквивалентных точек, вычисляются собственные значения фоновой компоненты каротажа.

Результат такой операции представлен на рисунке 3.5, где в его левой части показаны отклонения каротажных кривых скважины Игольская-12 от обобщенной скважины, вычисленной для Игольской, Таловой, Карайской и Федюшкинских площадей. Точно также, можно фоновые значения каротажа обобщенной скважины вычитать из рассчитанных значений трехмерных моделей, получая трехмерную модель распределения локальных компонент любого вида каротажа. В правой части рисунка 3.5 показаны два ортогональных разреза, вырезанных из трехмерной модели, построенной для стратиграфического диапазона от кровли баженовской свиты до кровли тюменской свиты. Выбранные разрезы пересекаются в районе скважины Игольская 12, на них отображена локальная компонента каротажа КС.



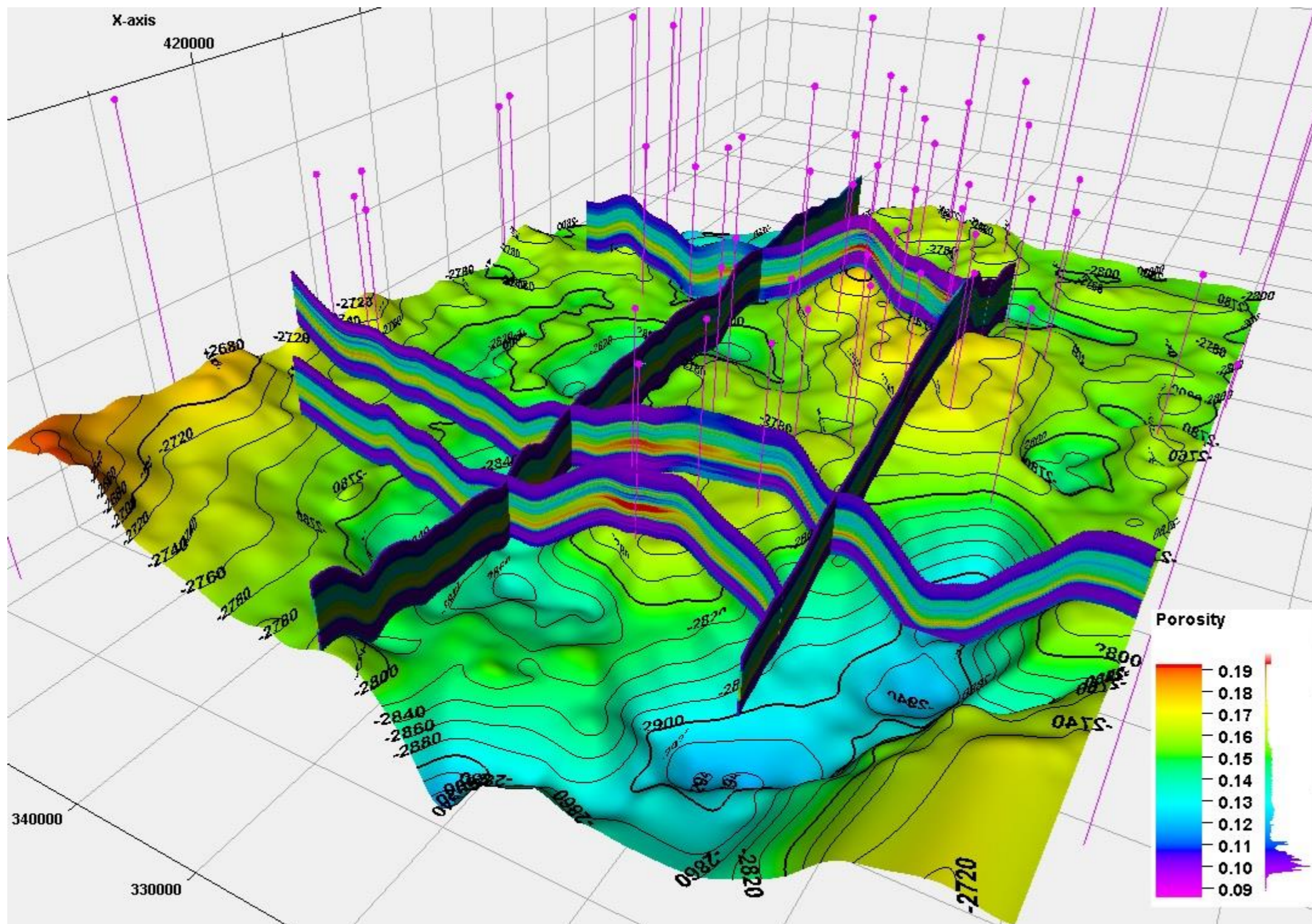


Рисунок 3.4 Куб пористости верхнеюрских отложений Нюрольской впадины, представленный набором сечений, и карта абсолютных отметок кровли тюменской свиты. Район Игольско-Талового месторождения.

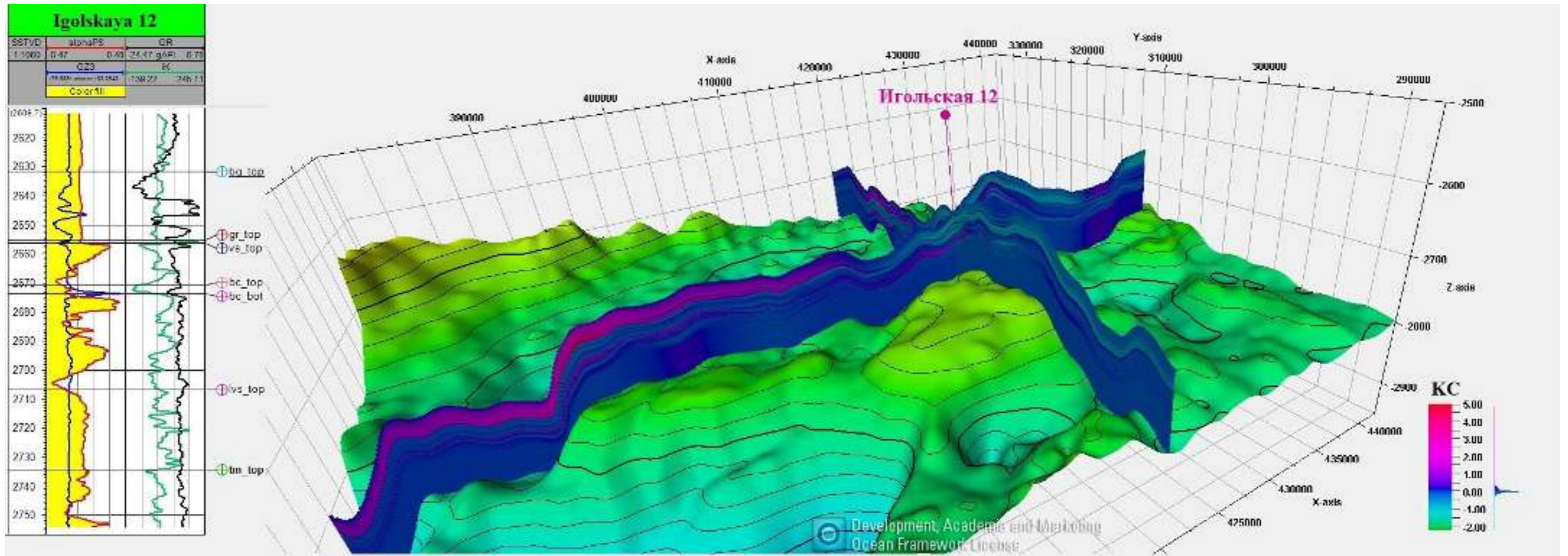


Рисунок 3.5 Локальная компонента каротажных кривых для скважины Игольская 12 и два ортогональных разреза, пересекающие её и отображающие локальную компоненту каротажа КС.

### **Выводы:**

1. Корреляционное решение, полученное для некоторого стратиграфического интервала на группе скважин, может служить основой для построения модели обобщенного образа каротажных кривых этой группы скважин. Этот процесс аналогичен созданию обобщенного изображения человеческого лица по многочисленным фотографиям разных людей Фрэнсиса Гальтона. Такие обобщенные «портреты» скважин могут быть полезны для представления наиболее общих особенностей в их каротажных кривых, отклонения кривых отдельных скважин от обобщенного образа должно трактоваться как проявление индивидуальных особенностей. Возможно, технология создания обобщенных образов скважин может быть использована для прогнозирования параметров разреза бурящийся скважины по результатам исследования имеющихся соседей.

## ГЛАВА 4 НЕПРЕРЫВНАЯ СЕЙСМОСТРАТИГРАФИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАК ОСНОВА СТРУКТУРНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РАЗРЕЗОВ МОГТ

*Если у вас есть яблоко и у меня есть яблоко, и если мы обменяемся этими яблоками, то у вас и у меня останется по одному яблоку. А если у вас есть идея и у меня есть идея, и мы обмениваемся этими идеями, то у каждого будет по две идеи.*

*Джордж Бернард Шоу*

### 4.1 Непрерывная сейсмостратиграфическая модель

Структурная интерпретация сейсмических данных – задача, которая появилась вместе с самой сейсморазведкой. Выход сборника статей «Сейсмическая стратиграфия» под редакцией Чарлза Пейтона в 1977 году дал импульс исследованиям по развитию инструментов отождествления сейсмических горизонтов со стратиграфическими границами, а также особенностей рисунков волновых полей с особенностями строения осадочных толщ в различных фациальных условиях. Стратиграфические отношения, которые описываются в создаваемых моделях, имеют дискретный характер.

Сейсмическая запись разреза или куба позволяет непрерывно отслеживать характерные особенности волнового поля, но сама сейсмостратиграфическая шкала, на которую отображается разрез – дискретна. К этой шкале привязывается конечное количество горизонтов, а их трассировка осуществляется последовательно и обычно независимо друг от друга. В любом из распространенных интерпретационных пакетов необходимо выбирать горизонт, который специалист будет трассировать и далее работать с ним. Детальность структурной интерпретации сейсмических материалов непосредственно определяется конечным числом выбранных и прослеженных горизонтов.

Традиционно задача структурной интерпретации данных суммированных и предварительно обработанных разрезов и кубов МОГТ решается путем выполнения ряда последовательных действий:

1. На разрезах или кубах выделяются узнаваемые горизонты, которые можно проследить на значительное расстояние. Эти горизонты соответствуют фазовым особенностям волнового поля. Как правило, используют горизонты, которые прослеживаются по локальным максимумам или минимумам полей. Также могут опознаваться и прослеживаться по разрезу переходы через ноль, при этом, если двигаться сверху вниз, различимы переходы от отрицательных значений к положительным и наоборот.
2. Эти горизонты отождествляются с некоторыми стратиграфическими границами, для чего, в частности, может проводиться ВСП (вертикальное сейсмическое профилирование) и работы по моделированию волнового поля, разрезов скважин. Сходством фрагментов синтетических и реальных волновых картин обосновывается привязка отражающих горизонтов к определенным частям стратиграфического разреза.
3. Последовательно, все горизонты прослеживаются на максимально большую площадь. В различных интерпретационных пакетах существуют методы трассировки в той или иной степени автоматизированные – от полностью автоматических до ручных. При прослеживании горизонтов, связанных со стратиграфическими границами, учитывается невозможность их пересечения и геометрическое подобие в пределах одного структурного этажа. Но принципиально то, что каждый горизонт прослеживается обособленно.
4. Далее, уже следуют задачи построения карт, создания 3D структурных и параметрических моделей.

Этот, весьма схематично описанный подход, можно охарактеризовать тем, что горизонты все-таки обрабатываются обособленно, их всего несколько. В этом смысле структурная модель дискретна. Эта дискретность проявляется, например, и в том, что детальность модели напрямую зависит от конечного числа выбранных горизонтов.

Помимо традиционного способа структурной интерпретации данных МОГТ, реализованного во всех индустриальных компьютерных системах (Petrel Schlumberger, Omega WesternGeco, Seiswork Landmark, Kingdom Suite IHS), в последние годы появились разработки, направленные на извлечения максимально полной структурной информации из 2D-3D сейсмических

данных. К числу таких решений относится технология создания многолистной поверхности, представляющая геометрическую интерпретацию максимально-возможного числа отражающих горизонтов, развиваемая в пакете DV-SeisGeo ЦГЭ [Кириллов, 2011; DV-SeisGeo, 2013]. Данное решение является частью пакета ЦГЭ, позволяющего конструировать и сопровождать числовые модели нефтяных и газовых залежей на основе интерпретации 2D/3D сейсмических, скважинных, промысловых и геологических.

Сходные технологии сейсмической интерпретации разрабатываются в голландской компании dGB Earth Science (<http://www.dgbes.com/>). Их методы построения куба сейсмических горизонтов [Bouanga et set., 2014] были успешно применены при структурной и фациальной интерпретации рифовых построек Ближнего Востока, песчаных тел формации МакМуррэй (McMurray) и в Канаде [Brouwer, de Groot, Kumpus, 2011].

Поскольку метод построения многолистных поверхностей программного продукта DV-SeisGeo имеет определенное сходство с решением, которое предложено и исследовано автором, и которое является одним из защищаемых положений, остановимся на его особенностях. Алгоритм построения многослойной поверхности сводится к последовательному выполнению следующих шагов:

1. **Фильтрации** (не обязательная процедура). Разработчики, однако отмечают, что проведенная предварительно диффузная или “вейвлет” фильтрация повышает коррелируемость волнового поля сейсмического разреза или куба, что обычно увеличивает устойчивость и качество получаемой модели. Помимо фильтрации, к используемым процедурам предобработки можно отнести и прореживание исходных кубов. По-видимому, необходимость данного процесса, обуславливается значительными затрачиваемыми вычислительными ресурсами.
2. **Построение условий для корреляционных точек.** На данном шаге определяется область конструирования модели, она может быть ограничена большими углами наклонов отражающих границ или существенной неоднородностью сейсмической записи.

3. **Построение корреляционного куба или разреза.** Это результирующий этап, в корреляционном кубе, предполагается, что точки, имеющие одинаковые значения, соответствуют одному стратиграфическому уровню.

При создании корреляционного куба рассчитываются и используются кубу углов наклона. Для их вычисления, в окрестности каждой точки куба с некоторым шагом изменения наклона палетки, анализируются направления анизотропии волнового поля. В дальнейшем эти кубы позволяют проследить трассировки границы, изначально заданной в некоторой произвольной точке. При дальнейшей доводке результата моделирования используются процедуры итерационного согласованного экстраполирования отдельных листов поверхности и «ручной» коррекции результата.

Анизотропия волнового поля позволяет определять ожидаемые углы наклонов отражающих границ, для вращающихся палеток, это обстоятельство было отмечено в работе [Скрипкин, 2009]. А то, что локально оцененные значения углов наклонов отражающих границ можно использовать для создания моделей условных отражающих горизонтов, в частности, было показано в работах автора совместно с Б.А. Канарейкиным, В.Ф. Свиныным и А.И. Мальцевым [Канарейкин и др., 1984; 1988]. В этих публикациях приведены результаты сплайн-аппроксимации отражающих границ, заданных своими наклонами по направлениям сейсмических профилей.

Предлагается новый способ получения структурной и параметрической информации о геологической среде, на основе вычисления сеймостратиграфического параметра, как непрерывной вещественной функции, заданной на всем разрезе (кубе) МОГ или на его фрагменте. Для данной функции отдельные изоуровневые линии (в 2D) или поверхности (в 3D) интерпретируются как сейсмические горизонты. Под **непрерывной сеймостратиграфической моделью** понимаем вещественную функцию -  $S(\Omega)$ , значение которой зависит от сеймостратиграфического положения точек разреза или куба. Здесь,  $\Omega$  - пространственная или пространственно-временная область, на которой задана функция  $S$ . Данную функцию также будем называть сеймостратиграфическим параметром. Главное преимущество такой модели состоит в том, что ее непрерывность позволяет

определять стратиграфическое расстояние между любыми точками среды, автоматически строить любое количество стратиграфически-эквивалентных линий или поверхностей (для кубов), а также получать стратиграфически-эквивалентные линии или поверхности, проходящие через любые заданные точки.

Предлагаемая непрерывная сеймостратиграфическая модель для разрезов МОГТ и способ её построения являются третьим защищаемым положением работы. Прежде чем излагать детали, покажем на примере что представляет данная модель – рисунок 4.1.



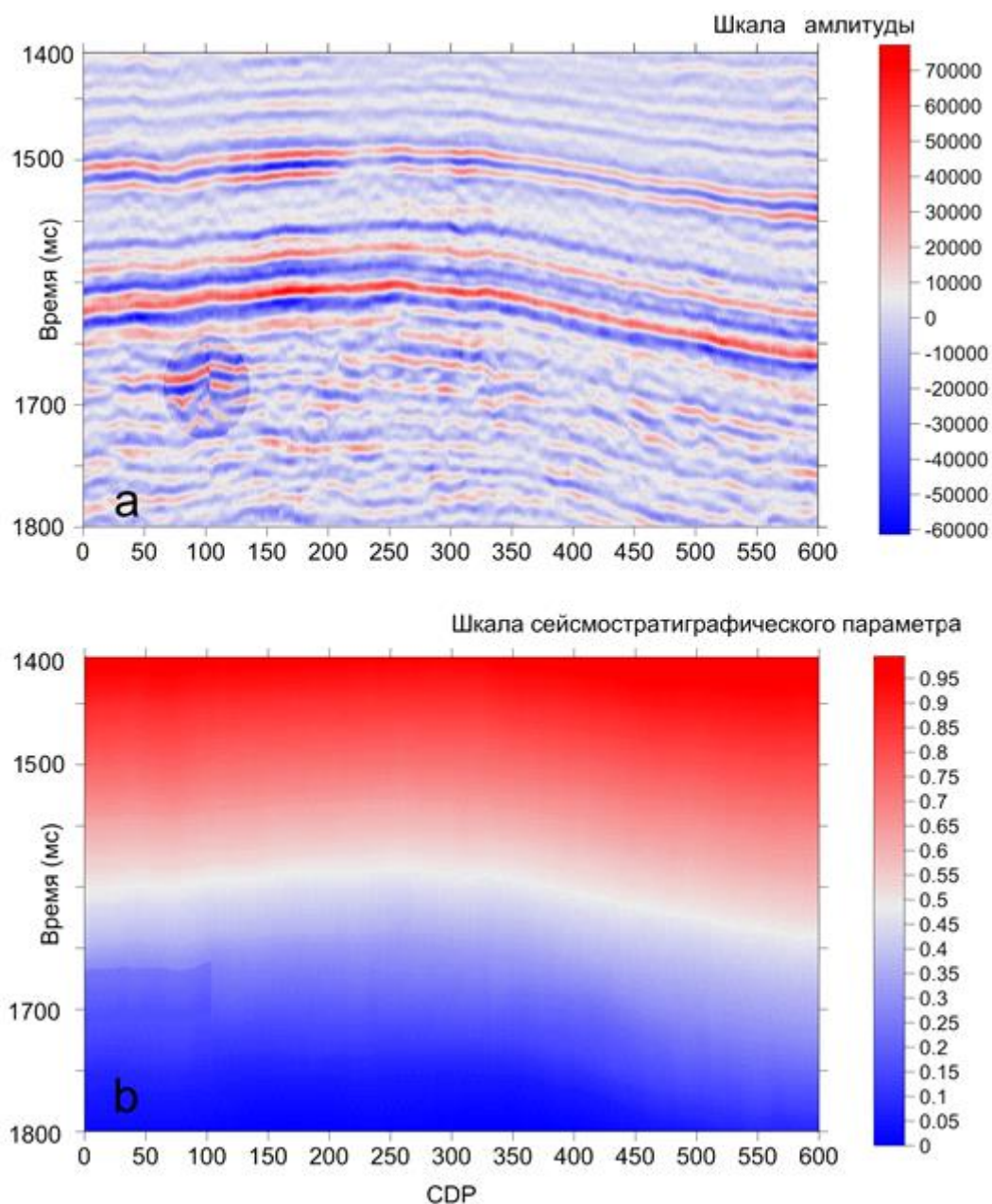


Рисунок 4.1 Разрез и его сейсмостратиграфическая модель: а – фрагмент сейсмического разреза МОГТ; b – непрерывная сейсмостратиграфическая модель для данного фрагмента.

На рисунке 4.1a приведен фрагмент сейсмического разреза. Выделенной яркой областью в левой нижней части разреза, показана зона небольшого разлома. В целом, волновое поле ведет себя достаточно согласно, в верхней части разреза можно выделить порядка десяти узнаваемых отражающих горизонтов. На рисунке 4.1b показана непрерывная сейсмостратиграфическая модель, полученная для данного разреза. Значение поля в каждой ее точке понимается как величина некоторой пространственной функции, **сейсмостратиграфической**

функции (параметра) -  $S(\Omega)$ , значение которой, зависит от стратиграфического положения точек разреза.

Получаемые нами непрерывные сеймостратиграфические модели позволяют:

1. Создавать дискретные модели, с любым числом «отражающих горизонтов». Если эти горизонты проводятся через специально заданные точки на сейсмических разрезах, то автоматически можно получать разбиения разреза на сеймостратиграфические комплексы. Пример, построения модели с набором горизонтов, проведенных с равным шагом по значениям  $S(\Omega)$  представлен на рисунке 4.2. Здесь справа, показана шкала амплитуд исходного временного разреза. Интересно, что область разрывного нарушения, которое показано на рисунке 4.1а проявилась ступенчатой рисовкой изолиний.

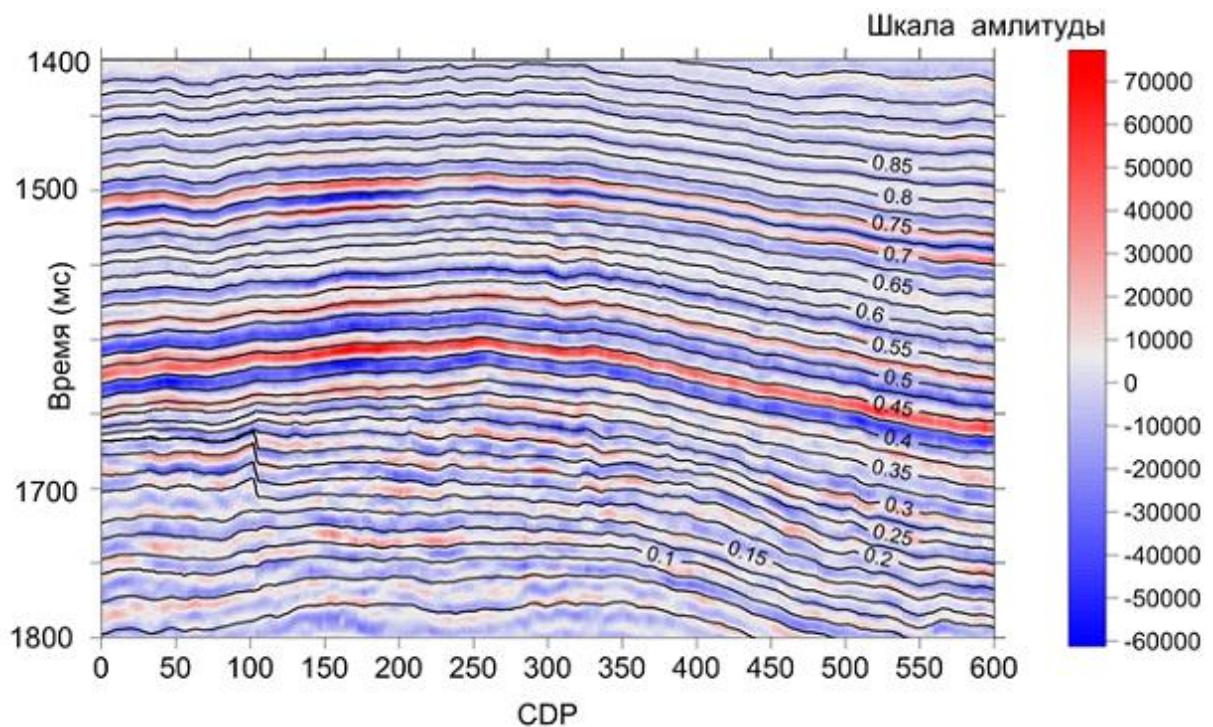


Рисунок 4.1 Временной сейсмический разрез с наложенными линиями уровня непрерывной сеймостратиграфической модели.

2. Эти модели служат идеальной основой для создания разрезов и кубов распределения некоторых параметров. То есть, если мы хотим построить распределение пористости на временном или глубинном разрезе, используя редкие скважинные данные, то один результат мы получим, если будем работать в пространстве  $(x, t)$ , и совершенно другой, причем гораздо лучший,

с точки зрения геолога, работая в пространстве  $(x, S)$ . В последнем случае при решении задачи интерполяции свойств мы будем учитывать стратиграфическое положение сравниваемых точек. Детальный пример этой ситуации приведен в разделе 4.4.3. Подобное распределение параметров, строится достаточно регулярно в практике работ в осадочных бассейнах. Например, недавно специалистами ВСЕГЕИ была создана технология построения 3D моделей распределения каротажных параметров, в которой учитывается геометрия отражающих границ [Технология автоматизированной корреляции данных ГИС, 2012]. Было показано, что качество модели существенно улучшается при учете структурных поверхностей. Но более естественным представляется прямое моделирование распределения параметров в пространственно-стратиграфической среде.

3. В отличие от моделей, связанных с отдельными отражающими горизонтами, непрерывная сеймостратиграфическая модель позволяет выполнять любые виды преобразований, вещественных функций – вычисление производных, градиента, фильтрации, сглаживание, преобразование Лапласа и т.п., что существенно расширяет возможности анализа.
4. На непрерывных сеймостратиграфических моделях легко выделять и проследивать разрывные нарушения.
5. Гораздо более информативным может быть палеотектонический анализ на основании непрерывных моделей. При конечном числе отражающих горизонтов, палеорекострукции возможны лишь для дискретных значений временных интервалов. Либо, необходимо привлекать дополнительные и не всегда обоснованные упрощения, например, вычислять вспомогательные стратиграфические уровни как линейные комбинации из основных.
6. Важнейшим применением непрерывных моделей может быть их использование в стратиграфической корреляции разрезов скважин. То есть, в решении той задачи, которой посвящена вторая глава работы. Известно, что все автоматизированные методы стратиграфической корреляции, имеют определенный уровень неоднозначности [Гришкевич, 1999; Гутман и др., 2006; Кашик и др., 2010]. Получаемые нами без учета скважинных данных сеймостратиграфические модели, служат хорошим регулятором и

ограничителем неопределенности при стратиграфических построениях, выполняемых на основании данных ГИС по разрезам скважин. Один из таких примеров приводится в конце данной главы.

7. И последняя важная особенность, модели представленного типа строятся полностью в автоматическом режиме.

Приведенный пример – рисунки 4.1 и 4.2, может создать не вполне верное представление о том, что построение подобных непрерывных моделей допустимо лишь для достаточно простых геологических ситуаций. Чтобы показать обратное, в качестве примера, приводится результат полностью автоматической интерпретации разреза для отложений, в которых присутствуют клиноформные комплексы неокома севера Западной Сибири – Рисунок 4.3.

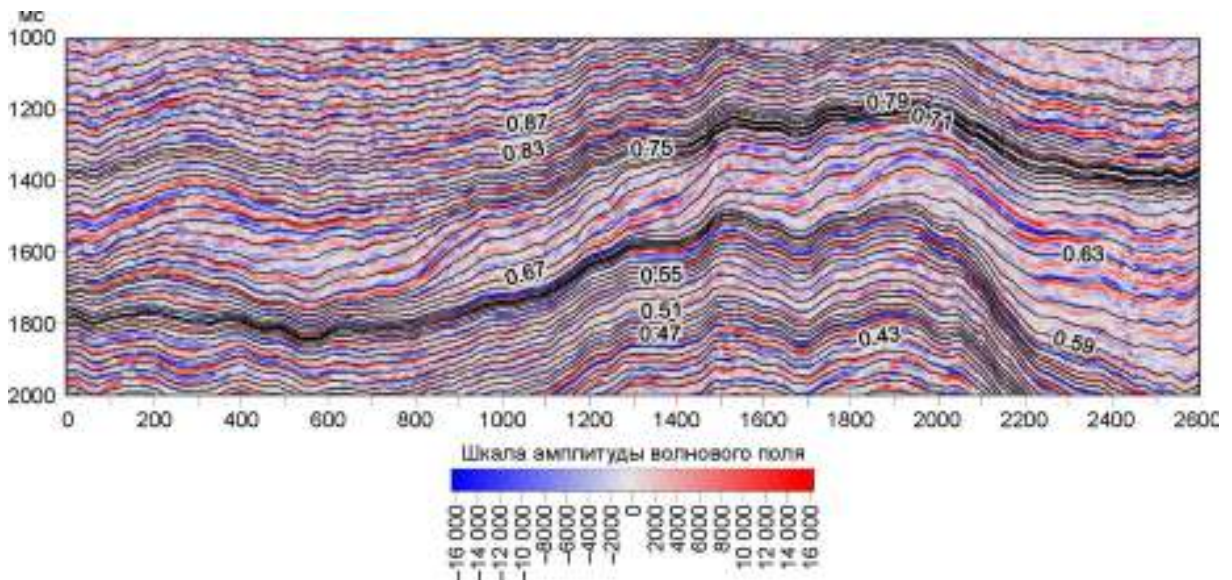


Рисунок 4.3 Результат автоматической непрерывной корреляции одного из сейсмических разрезов севера Западной Сибири.

Этот пример показателен и тем, что для большей части разреза, отражения являются достаточно неустойчивыми, они прослеживаются фрагментарно, при этом их характерная амплитуда заметно меняется. Тем не менее, результат структурной интерпретации получился достаточно убедительным. Несмотря на фрагментарность отражений, линии равных значений сейсмостратиграфического параметра ведут себя весьма согласованно с окружающей их волновой картиной. На рисунке также видно, что сейсмостратиграфические комплексы, со значениями соответствующего параметра от 0.55 до 0.75, заметно изменяются по своей мощности. Эти изменения соответствуют изменению начальной мощности

осадков более чем в 100 раз. Ситуация для коррелирования, также осложнена еще и тем, что разрез пересекает антиклинальное поднятие.

Приведенный список не исчерпывает положительные особенности непрерывных сейсмостратиграфических моделей. На некоторые, важные моменты мы обратим внимание по мере изложения процедуры их создания, о которой пока еще ничего не было сказано.

#### **4.2 Метод построения непрерывных сейсмостратиграфических моделей**

Для решения задачи, в качестве базового метода мы использовали процедуры парной корреляции разреза скважин, которые детально описаны во второй главе. То есть, сейсмический разрез (или его интересующая часть) представляется как бы набором отдельных скважин, «каротажем» для которых являются значения амплитуд на трассах сейсмического разреза. Далее, использовался один из двух методов «межскважинной» корреляции – метод муравьиной колонии и волновой алгоритм – реализованный Власовым А.А. То есть, мы строили корреляционную модель на планшете Жековского для многих пар трасс разреза (как бы скважин). Затем эти решения объединялись в одной модели, для чего использовалась следующая последовательность операций:

1. Случайным образом выбираем на разрезе некоторую трассу.
2. Для этой трассы задается начальное распределение сейсмостратиграфической функции. А именно, заданный диапазон значений этой функции (обычно от 0 до 1), линейно растягиваем по всему временному интервалу трассы. То есть в начальном приближении, стратиграфическая функция линейна на выбранной трассе.
3. Имея корреляционные решения между всеми парами трасс (пар существенно больше чем трасс в разрезе), переносим значения этого начального приближения последовательно на все трассы разреза. Поскольку корреляционные решения, в общем случае не являются линейными (это в общем случае кривая линия оптимальной корреляции), стратиграфическая функция на всех остальных трассах, кроме выбранной, обычно оказывается нелинейной.

4. Затем процесс повторяем с другой случайно выбранной трассой. А окончательный результат находим усреднением с равными весами результатов каждого такого повторения.

Далее опишем процедуру создания и использования парных отображений сейсмических трасс. Для пар сейсмических трасс  $t_i, t_{i+k}$ , с некоторым шагом  $1 \leq k \leq n$  отстоящих друг от друга, вычисляют двумерные функции  $f(t_i, t_{i+k})$ , характеризующие степень различия сейсмических записей (амплитуда, частота или любой вычисленный атрибут) в окрестности произвольно взятых точек на этих трассах.

В поле этой функции строят неубывающую линию (условие неубывания возникает из невозможности пересечения сейсмостратиграфических горизонтов)  $L_i^k$ , соединяющую угловые точки  $(t_i^{\min}, t_{i+k}^{\min})$  с  $(t_i^{\max}, t_{i+k}^{\max})$ , и оптимизирующую сопоставление сейсмических трасс по критерию их минимального интегрального различия

$$\int_{L_i^k} f(t_i, t_{i+k}) dL_i^k \rightarrow \min. \quad (4.1)$$

Эта линия задает лучшее по данному критерию соответствие между областью времен/глубин сравниваемых трасс. Линия  $L_i^k$  позволяет задать две функции оптимального перехода от времени/глубины на  $i$ -той трассе к времени/глубине на  $i+k$ -той трассе и наоборот

$$t_{i+k} = \varphi_+^k(t_i) \quad (4.2)$$

$$t_i = \varphi_-^k(t_{i+k}) \quad (4.3)$$

Используя набор этих функций можно сделать различные оценки для отображения оптимального перехода времени/глубины между всеми соседними трассами.

$$t_{i+1} = \varphi_+(t_i) = t_i + \Delta(t_i) \quad \text{и} \quad (4.4)$$

$$t_i = \varphi_-(t_{i+1}) = t_{i+1} - \Delta(t_i). \quad (4.5)$$

Для оценки  $\Delta(t_i)$  могут использоваться функции следующего вида

$$\Delta(t_i) = \frac{\sum_{k=1}^n w[k] \cdot [(\varphi_+^k(t_i) - t_i) - (\varphi_+^{k-1}(t_{i+1}) - t_{i+1})]}{\sum_{k=1}^n w[k]} \quad (4.6)$$

или

$$\Delta(t_i) = \frac{\sum_{k=1}^n w[k] \cdot [(\varphi_+^k(t_i) - t_i)]/k}{\sum_{k=1}^n w[k]}. \quad (4.7)$$

Здесь  $W[k]$  – заданный вектор весов (положительных значений, возможно одинаковых), для учета вклада в результат каждого перехода между каждой  $i$ -той и  $i+k$ -той трассами.

Набор отображений времени/глубины всех соседних трасс, позволяет переносить некоторые априорно заданные параметры (в данном случае переносится априорно заданное значение сейсмостратиграфического параметра) на предыдущую или следующую трассу.

$$q(t_{i+1}) = q[\varphi_+(t_i)] \quad \text{и} \quad (4.8)$$

$$q(t_{i-1}) = q[\varphi_-(t_{i-1})] \quad (4.9)$$

Здесь  $q$  – любая функция определенная, на  $i$ -той трассе.

Построение сейсмостратиграфической функции для разреза выполняется следующим образом:

1. Создается  $M$  реализаций данной функции на разрезе. В каждой  $j$ -той реализации случайно выбирается одна трасса.
2. На выбранной трассе априорно линейно задаются значения сейсмостратиграфической функции в диапазоне от 0 до 1.
3. Эти исходно заданные на одной  $j$ -той трассе значения с помощью отображений, заданных (4.8) и (4.9) переносятся на все трассы разреза. Таким образом получаем  $j$ -тую реализацию распределения сейсмостратиграфического параметра.
4. Результирующее пространственное распределение сейсмостратиграфического параметра вычисляем как

$$S(\Omega) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M S_j(\Omega) \quad (4.10).$$

Принципиальное отличие предлагаемого подхода к прослеживанию сейсмических горизонтов состоит в том, что решение строится не для отдельных

горизонтов разреза, а находится путем оптимизации на всем диапазоне времен или глубин, то есть решение принимается сразу по всем фазовым особенностям. Когда отслеживается одна фаза при нестабильной волновой картине, часто возникают точки (точки бифуркации), где его решение неоднозначно. Ошибочная трассировка, допущенная для любого из горизонтов, влияет и на все последующие построения. Решения, получаемые независимо по отдельным горизонтам, менее устойчивы и существующие методы автоматической трассировки в сложных ситуациях обычно нуждаются в ручной коррекции.

### **4.3 Проблема фазового скольжения корреляционных линий и её решение**

Если внимательно посмотреть на рисунок 4.3, то можно отметить, что большинство корреляционных линий не имеет строгой фазовой приуроченности. Так изолиния, со значением сейсмостратиграфического параметра 0.63 в правой части разреза, проходит под синей (отрицательные значения волнового поля) областью, а левее на 700 трасс, в области максимальной амплитуды антиклинального поднятия, эта же изолиния проходит под красной областью, то есть, под положительными значениями в волновом поле. Рисовка изолиний достаточно хорошо отражает общую волновую картину разреза, но строгая фазовая приуроченность при сопоставлении региональных или сложнопостроенных разрезов зачастую нарушается. Изложенный выше метод не имеет контроля с точки зрения привязки изоуровневых поверхностей к локальным максимумам, минимумам или переходам через ноль амплитуды зарегистрированного сейсмического сигнала. Составляя решения путем оптимального перехода последовательно через сотни или тысячи трасс, мы неизбежно накапливаем случайные искажения, получаемые при многочисленных суммированиях и округлениях.

Из теоретических моделей формирования волнового поля разрезов МОГТ следует, что граница, разделяющая различные значения акустической жесткости при однократном отражении от них воздействующего импульса, должна соответствовать одинаковой фазе волнового поля. Возникающее фазовое



скольжение противоречит сложившейся практике структурной интерпретации сейсмических данных. Какие варианты решения данной проблемы можно предложить:

1. Принять интерпретацию волнового поля такой, какой она получена в процессе построения модели. Достаточно типична следующая ситуация – скольжение не происходит по наиболее выразительным фазам, но в области частичных отражений модель повторяет только основные тенденции простираения границ. В такой ситуации формальная подтяжка значений стратиграфической функции к хаотическим или неустойчивым отражениям может быть не оправданной. В классической работе «Сейсмическая стратиграфия» [Митчем мл., Вейл, Сангри, 1982] показано, что для ряда фациальных типов осадочных толщ вообще не характерны устойчивые закономерные отражения. Такие типы отражений как «черепицеобразные», «бугристые» и «хаотические» не должны аппроксимироваться параллельными контурами сеймостратиграфических изолиний. Пример подобной ситуации показан на центральной части рисунка 4.4. Также хаотический рисунок волновых полей часто наблюдается благодаря эффектам многократного отражения и преломления волн и их интерференцией.

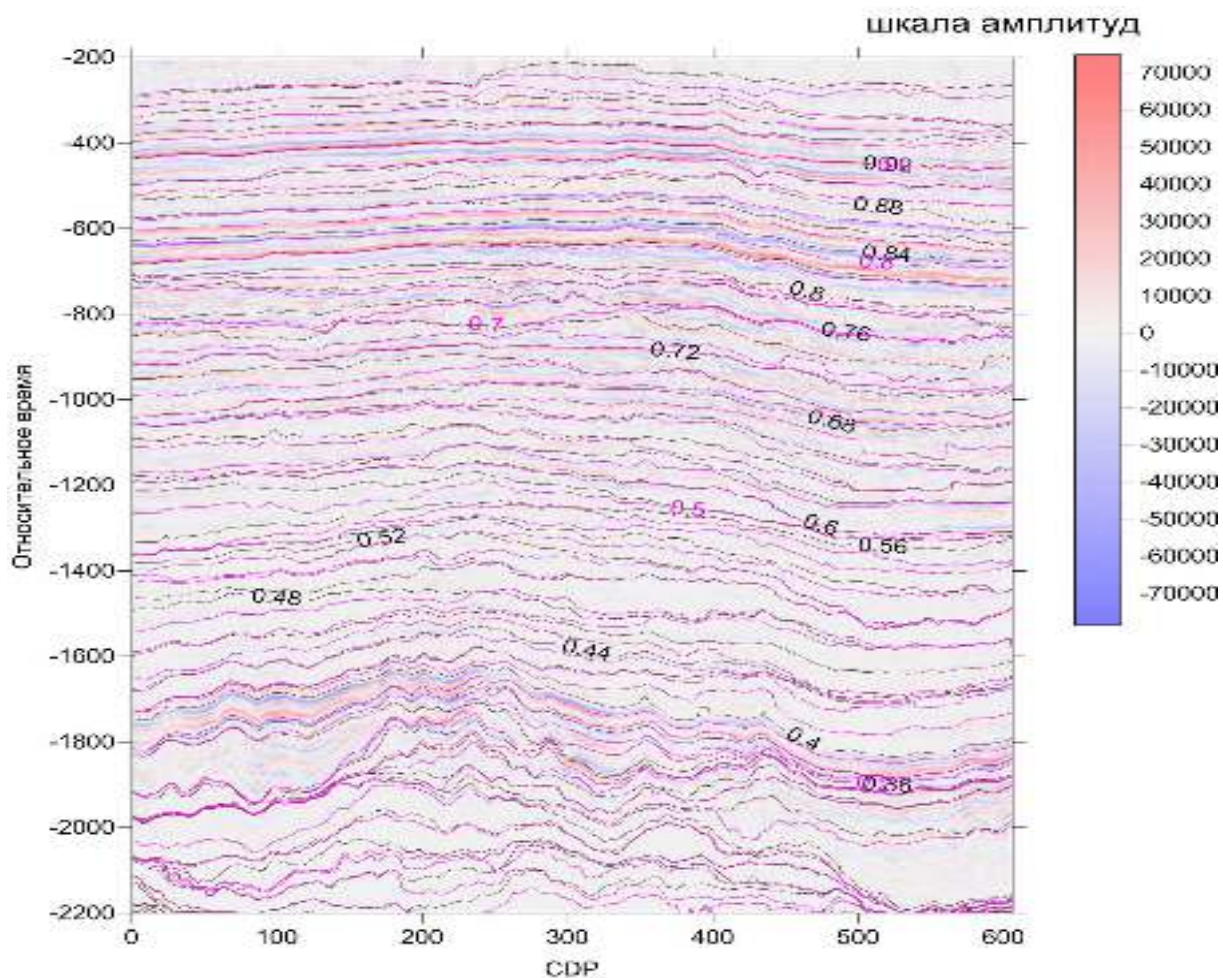


Рисунок 4.4 - Фрагмент временного сейсмического разреза с неустойчивым видом волнового поля в центральной части рисунка и наложенными линиями уровней сейсмостратиграфической функции.

2. Следующее решение, позволяющие более точно приблизить изолинии непрерывной сейсмостратиграфической функции к определенным фазовым особенностям строится в два шага, оно иллюстрируется примером на рисунке 4.5.

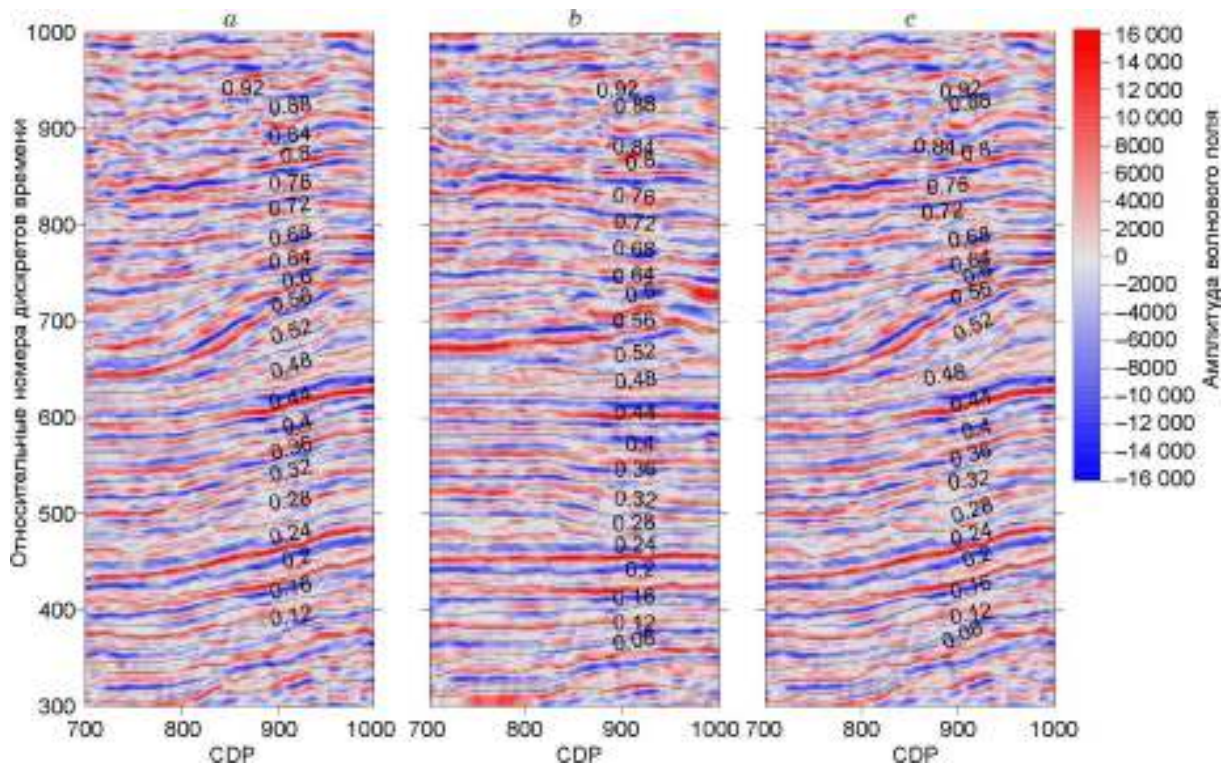


Рисунок 4.5 Преобразование разреза. а – исходный разрез МОГТ, б – промежуточное состояние, с - результирующее состояние.

На Рисунке 4.5а цветом показан фрагмент временного разреза МОГТ. Изолинии, нанесенные сверху, соответствуют значениям сейсмостратиграфической функции, которая получена при некоторых заданных параметрах способом описанном выше. Далее эта модель «распрямляется», то есть все изолинии рисунка 4.5а распрямляются, при этом трансформируются и значения исходного волнового поля. Получаемый при этом результат показан цветом на Рисунке 4.5б. Эту операцию иногда используют при фациальном анализе осадочных бассейнов, откладывая на одной горизонтали характеристики, в том числе и характеристики волнового поля одного стратиграфического уровня. Результат такого спрямления интерпретируется как модель Вальтера-Головкинского, или, что более свойственно работам по трансформации волновых полей – преобразование Уиллера [[www.dgbed.com/index.ptp/ssis/html](http://www.dgbed.com/index.ptp/ssis/html)]. Суть данного преобразования можно охарактеризовать как одновременное выравнивание сейсмогеологического разреза по многим стратиграфически эквивалентным поверхностям, с приведением мощностей всех тел к постоянным по разрезу

значениям. После данной процедуры разрез выглядит как область с субгоризонтальными неоднородностями – рисунок 4.5b. Для такого трансформированного разреза можно построить собственную непрерывную сейсмостратиграфическую функцию, соединяющую линиями равных значений наиболее похожие области соседних трасс, такая функция показана изолиниями на рисунок 4.5b. Можно считать, что по отношению к исходному разрезу, сейсмостратиграфическая функция по которой произошло выравнивание – это фоновая компонента, полученная далее - некий аналог высокочастотной локальной компоненты этого поля. Комбинация двух этих решений, показанная изолиниями на рисунке 4.5с, дает более строгое фазовое соответствие этих линий и соответствующих особенностей волнового поля. Это наиболее четко проявлено в нижней части разреза, фазовое скольжение заметно после первого выделения из разреза стратиграфической составляющей – рисунок 4.5а, и значительная часть эффекта скольжения убирается при уточнении модели на втором (выравнивание и построении остаточной сейсмостратиграфической компоненты) и третьем шаге (объединение двух компонент сейсмостратиграфической функции).

3. Третья возможность – построение линий строго по локальным особенностям волнового поля с учетом допустимых отклонений на них сейсмостратиграфического параметра. Введем понятие полной фазовой трассировки разреза следующим образом. Для каждой трассы разреза выберем все его локальные максимумы, минимумы, прохождение через ноль от меньших к большим значениям и наоборот. Ближайшие однотипные особенности соседних трасс объединяются в один горизонт, если стратиграфическое расстояние между этими особенностями меньше заданной малой величины. Это и есть полная фазовая трассировка разреза – пример которой показан на рисунке 4.6.

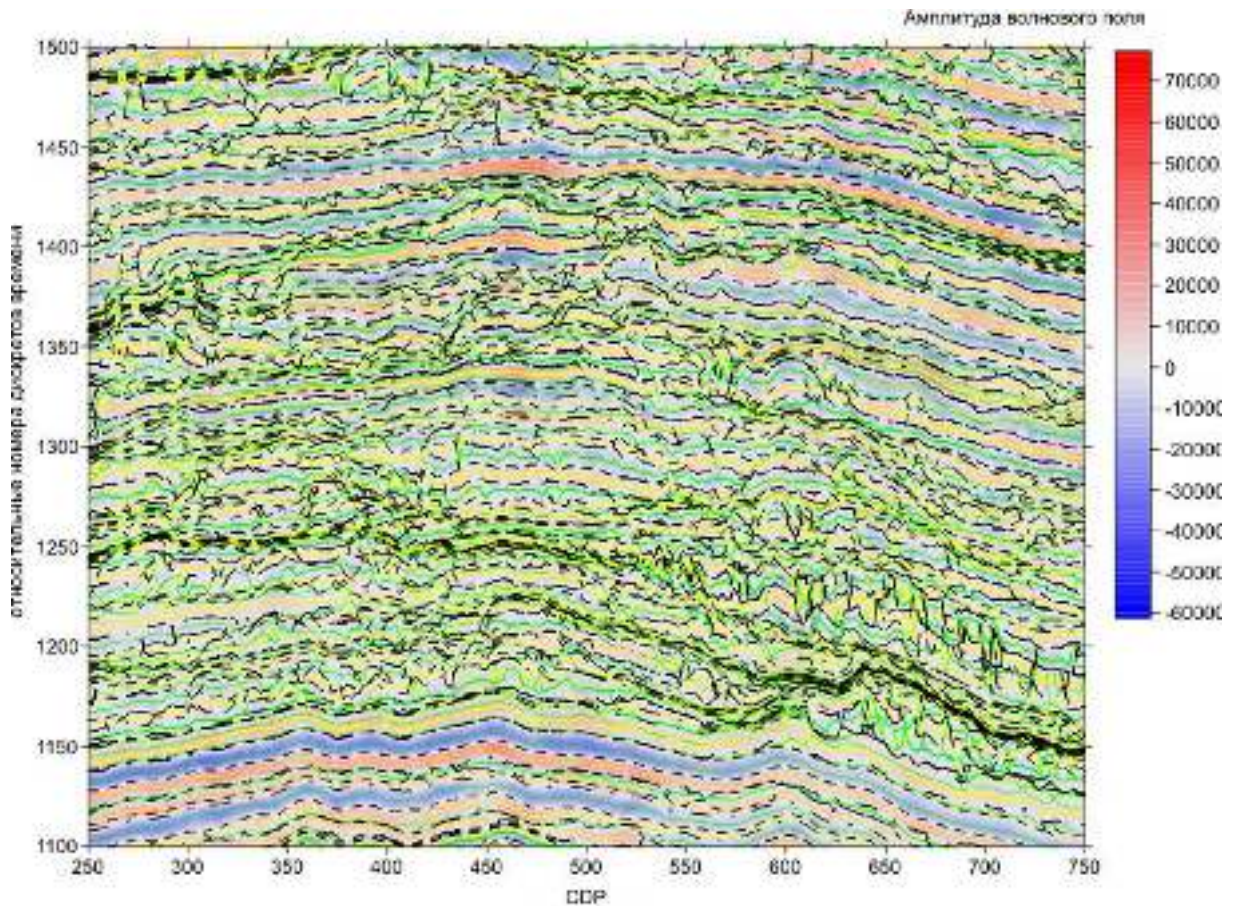


Рисунок 4.6 - полная фазовая трассировка разреза. Условные обозначения: 1 – локальные максимумы, 2 – локальные минимумы, 3 – переход через ноль от меньших к большим значениям, 4 - переход через ноль от больших к меньшим значениям.

Характерной особенностью фазовых трассировок является то, что в областях неустойчивых отражений фазовые трассировки сходятся. При прослеживании горизонтов традиционными средствами, возможны «перескоки» их с уровня на уровень. Построение полной фазовой трассировки разреза представляется полезным как промежуточный этап работы, в ходе которой отбирается конечное число наиболее выраженных горизонтов с контролем их не пересечения и возможным сглаживанием. Пример такого результата, с отбором и сглаживанием нескольких отражающих горизонтов проведенных по локальным максимумам амплитуд, показан на рисунке 4.7.

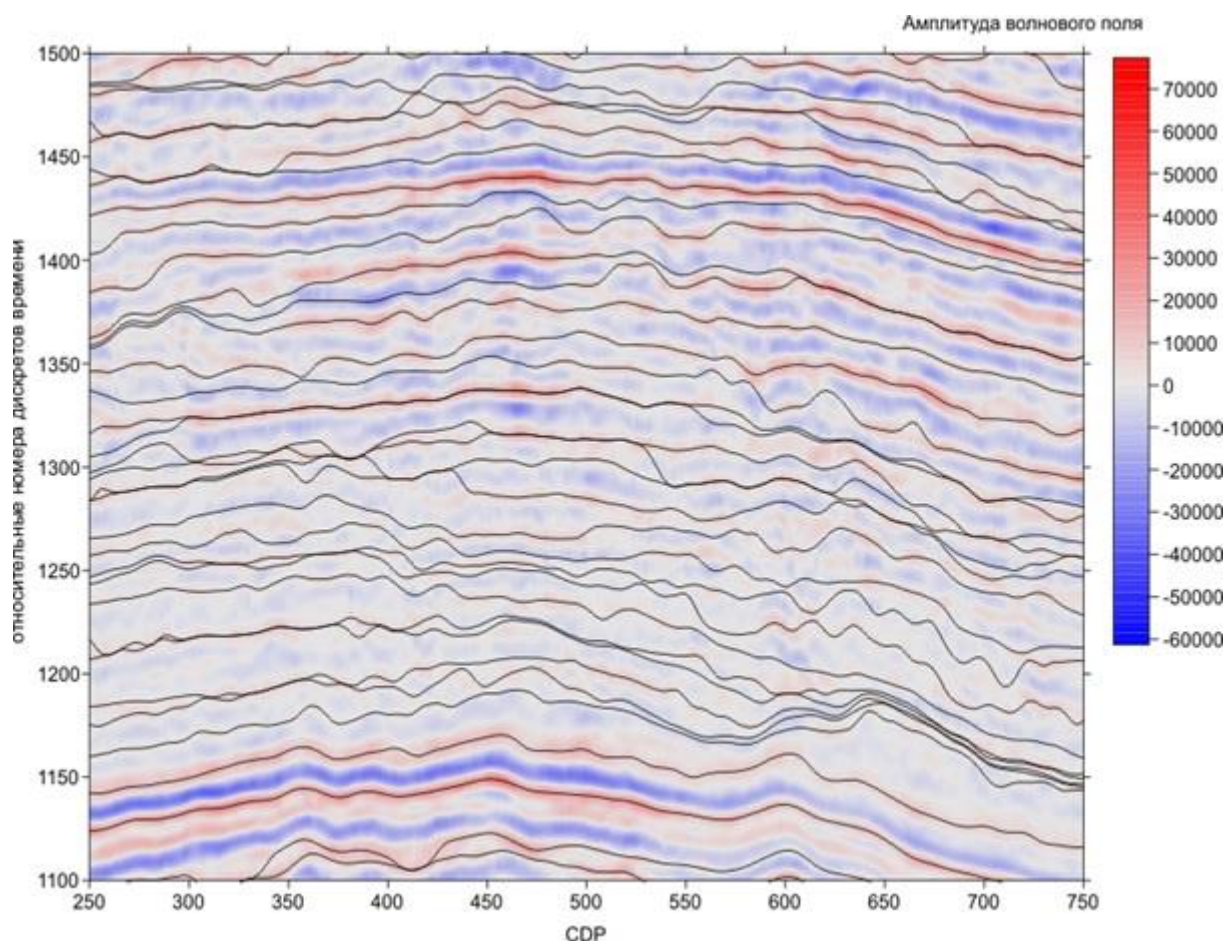


Рисунок 4.7 Трассировка со сглаживанием и контролем не пересечения по отдельным локальным максимумам.

#### **4.4 Тестирование возможностей использования непрерывной сейсмостратиграфической модели для решения задач интерпретации геолого-геофизических данных**

Один из масштабных тестов, проведенный для оценки эффективности использования непрерывной сейсмостратиграфической модели, был выполнен на синтетическом объекте, сгенерированном вообще говоря для других задач. Чем обусловлен такой выбор? Для решения задачи построения физической модели, образования клиноформных комплексов Западной Сибири, была создана соответствующая геолого-механическая модель [Конторович, Лапковский, Лунёв, 2014], и такой объект у нас имелся. Другая, и существенно более важная, причина выбора синтетического объекта, состоит в том, что нам известны все

пространственные свойства этого идеального объекта. Соответственно, мы можем количественно оценивать погрешности наших стратиграфических, структурных или параметрических построений. Если выбирается реальный объект, то до конца не известно, как он устроен, а получаемые на нем результаты могут оцениваться только с позиции геологической правдоподобности. Важно и то, что качество результатов для реальных объектов, в значительной степени зависит от того, насколько точна используемая скоростная модель среды. Задачи построения скоростных моделей в данной работе не рассматриваются. Приняв недостаточно обоснованную скоростную модель, можно дискредитировать в целом хорошо работающий метод.

#### 4.4.1 Модель формирования рельефа фундамента осадочного бассейна

Формально, динамическое равновесие поверхности планеты определяется следующим образом. Показано [Мясников, Фадеев, 1980; Лунёв, 1986; Лунёв, 1996], что, условия свободной поверхности

$$(\mathbf{T} \cdot \mathbf{n})_F = 0, \quad (4.11)$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla F = 0; \quad (4.12)$$

с точностью до малых величин порядка  $\varepsilon = A/L$ ,  $A$  – амплитуда,  $L$  – горизонтальный размер возмущения поверхности (в пределах нескольких процентов для крупных форм рельефа) аппроксимируются условиями

$$(\tau_{xz} = 0)_{z=0}, \quad (4.13)$$

$$(v_z = 0)_{z=0}. \quad (4.14)$$

Здесь  $\mathbf{T}$  – напряжения,  $\boldsymbol{\tau}$  – возмущения напряжений, по сравнению с гидростатическим состоянием,  $F(\mathbf{x}, z, t) = z - h(\mathbf{x}, t) = 0$  – уравнение поверхности (в данном случае имеется в виду свободная поверхность планеты),  $\mathbf{v}$  – скорость тектонических движений, ( $v_z$  – ее вертикальная компонента);  $\mathbf{x}$  – горизонтальные координаты,  $z$  – вертикальная координата,  $z = 0$  – соответствует гидростатическому, невозмущенному состоянию свободной поверхности. (В планетарном масштабе,  $z = 0$  – это эллипсоид вращения, а  $\{\mathbf{x}\}$  – широта и долгота,

в региональном – можно оперировать некоторой горизонтальной поверхностью и локальными декартовыми координатами).

При этом,  $h$  – величина (высота/глубина) отклонения свободной поверхности в данный момент времени от гидростатического состояния  $z = 0$  в точке с данными горизонтальными координатами  $\{x\}$ , определяется весьма просто, если известно  $\tau_{zz(x,z=0)}$ :

$$\tau_{zz(x,z=0)} = -g \int_0^{h(x)} \Delta\rho dz, \text{ или} \quad (4.15)$$

$$h(x) = -\frac{\tau_{zz(x,z=0)}}{g\widetilde{\Delta\rho(x)}}. \quad (4.16)$$

Здесь  $\Delta\rho = \rho^\Phi - \rho$  – отклонение плотности вещества ( $\rho$ ) на уровне  $z$ , от плотности фундамента ( $\rho^\Phi$ );  $\widetilde{\Delta\rho(x)}$  – среднее значение  $\Delta\rho$  по промежутку  $\delta z(x) = [0, h(x)]$ ;  $g$  – модуль ускорения свободного падения; а  $\tau_{zz(x,z=0)}$  – вертикальное нормальное напряжение, создаваемое в точке  $\{x\}$  на поверхности  $z = 0$  динамикой недр. Таким образом, формулы (4.15, 4.16) выражают динамическое равновесие между весом топографических масс и силами, обусловленными тектоническими движениями. Равенство (4.14) означает стационарность свободной поверхности при неизменном распределении сил в недрах, т.е. – рельеф изменяется вместе с изменением конфигурации эндогенных сил, и вертикальная скорость движения свободной поверхности (ее эндогенная составляющая) определяется изменением напряжения  $\tau_{zz(x,z=0)}$ .

Используя соотношения (4.15, 4.16) и задавшись некоторой моделью сноса, отложения и уплотнения осадков, можно рассчитать модель заполнения осадочного бассейна.

#### 4.4.7 Модель заполнения осадочного бассейна

Заполнение бассейна осадками будем моделировать следующим образом. Будем считать, что на каждый момент времени  $t^i$ , для каждой точки с горизонтальными координатами  $\{x\}$ , разрез задан:

- 1) набором слоев отложившихся осадков, разделенных изохронными поверхностями  $z_k^i, k = [1, i]$ . Состав осадков, определяемый соотношением нескольких терригенных фракций, по разрезу изменяется дискретно, так



что в интервале  $[z_k^i, z_{k+1}^i]$ , для каждой точки  $\{x\}$  он фиксирован –  $c_k^i$ . Разрез начинается снизу, с ложа бассейна –  $z_1^i$ ;

- 2) слоем свежееотложившегося осадка состава  $c_s^i$ , толщиной  $h_s^i$ ;
- 3) слоем воды толщиной  $h_w^i$ ;
- 4) слоем воздуха толщиной  $h_a^i$ .

Каждая точка  $\{x\}$  характеризуется расстоянием до берега, откуда поступают осадки –  $l^i$ . Фракционный состав  $c_s^i$  и мощность  $h_s^i$  осадка, отложившегося в точке  $\{x\}$  за время  $\Delta t$ , определяются заданными условиями в области сноса, расстоянием  $l^i$  и глубиной воды  $h_w^i$ . (Любая из толщин  $h_s^i, h_w^i, h_a^i$ , конечно, может быть равна нулю.) В свою очередь, состав осадка и заданный закон его уплотнения с глубиной вместе с текущей глубиной слоя (отметки  $z_k^i$  и  $z_{k+1}^i$ ), определяют его плотность  $\rho_k^i$  и актуальную толщину данного слоя  $h_k^i = z_{k+1}^i - z_k^i$ . Накопившийся осадок, в случае его выведения выше базиса эрозии, может быть разрушен и переотложен (поднятая область становится областью сноса).

Для любого момента времени  $t^i$  можно считать:

$$\tau_{zz(x,z=0)} = \sum_{k=1}^{k=i} [\Delta\rho_k^i \cdot (z_k^i - z_{k-1}^i)] + \Delta\rho_s^i \cdot \delta h_s^i + \Delta\rho_w \cdot h_w^i + \Delta\rho_a \cdot h_a^i.$$

Здесь  $\tau_{zz(x,z=0)}$  – оценка вертикальной компоненты тензора напряжения на поверхности консолидированного фундамента бассейна. Значок « $\Delta$ » означает, что имеется в виду разность плотности осадка  $\rho_k^i$  (воды  $\rho_w^i$ , воздуха  $\rho_a^i$ ) с отсчетной гидростатически равновесной, в качестве которой можно рассматривать, скажем, плотность пород фундамента.

Скорость накопления каждой фракции осадка в точке, характеризуемой расстоянием от берега  $l^i$  и глубиной воды  $h_w^i$  будем задавать в соответствии с моделью Слосса [Харбух, Бонэм-Картер, 1974; Кулагин, Мушин, 1994]:

- Глубина воды в данной точке определяет возможность отложения любой из заданных фракций. В данной работе мы оперировали песчаной, алевритовой и глинистой фракциями.
- Скорость накопления каждой фракции (там, где её отложение возможно) экспоненциально убывает с удалением от берега; параметры экспоненты для каждой фракции свои.

Общая мощность сноса может быть задана как постоянная величина, функция времени и/или высоты прилегающей к бассейну суши.

Закон уплотнения для каждой фракции осадка был принят в соответствии с результатами региональных исследований пород неокома Западной Сибири [Нестеров, 1965; Икон, Конюхов, Мороз, 2009].

Мы задавали начальное значение  $\tau_{zz}(x,z=0)$  в пределах  $3.2 \cdot 10^6$  Па, что соответствует 200 метрам глубины бассейна, заполненного водой, но без осадков. Ширина бассейна составила около 700 км. Ограничивая мощность сноса величиной  $100 \text{ км}^3$  на 1 км береговой линии с правого берега и  $30 \text{ км}^3$  с левого. Эволюция заполнения рассчитывалась для периода времени в 40 миллионов лет (приблизительное время накопления неокомского клиноформного комплекса Западной Сибири). При этом учитывалось, что эндогенный процесс, приведший к образованию Западно-Сибирского осадочного бассейна, продолжается в течение рассматриваемого периода, увеличивая  $\tau_{zz}(x,z=0)$  вдвое за все это время (в отсутствие осадконакопления, глубина бассейна достигла бы 400 метров, определяя скорость собственно тектонического погружения в пределах 5 метров за 1 миллион лет, или 5 мм за 1000 лет).

Выраженная слоистая структура накапливаемых толщ, обуславливается вариациями условий осадконакопления (объем сноса, уровень моря и т.п.). С целью моделирования таких вариаций, задавались стохастические квазипериодические возмущения высоты уровня моря, с ограничением на каждую из гармоник  $\pm 25$  метров.

На рисунке 4.8 представлен один из вариантов рассчитанной эволюции. Видно, что за все время эволюции, максимальная глубина воды в бассейне уменьшалась от 200 до 50 метров. Что не помешало накопиться более чем 1000 метров осадков.

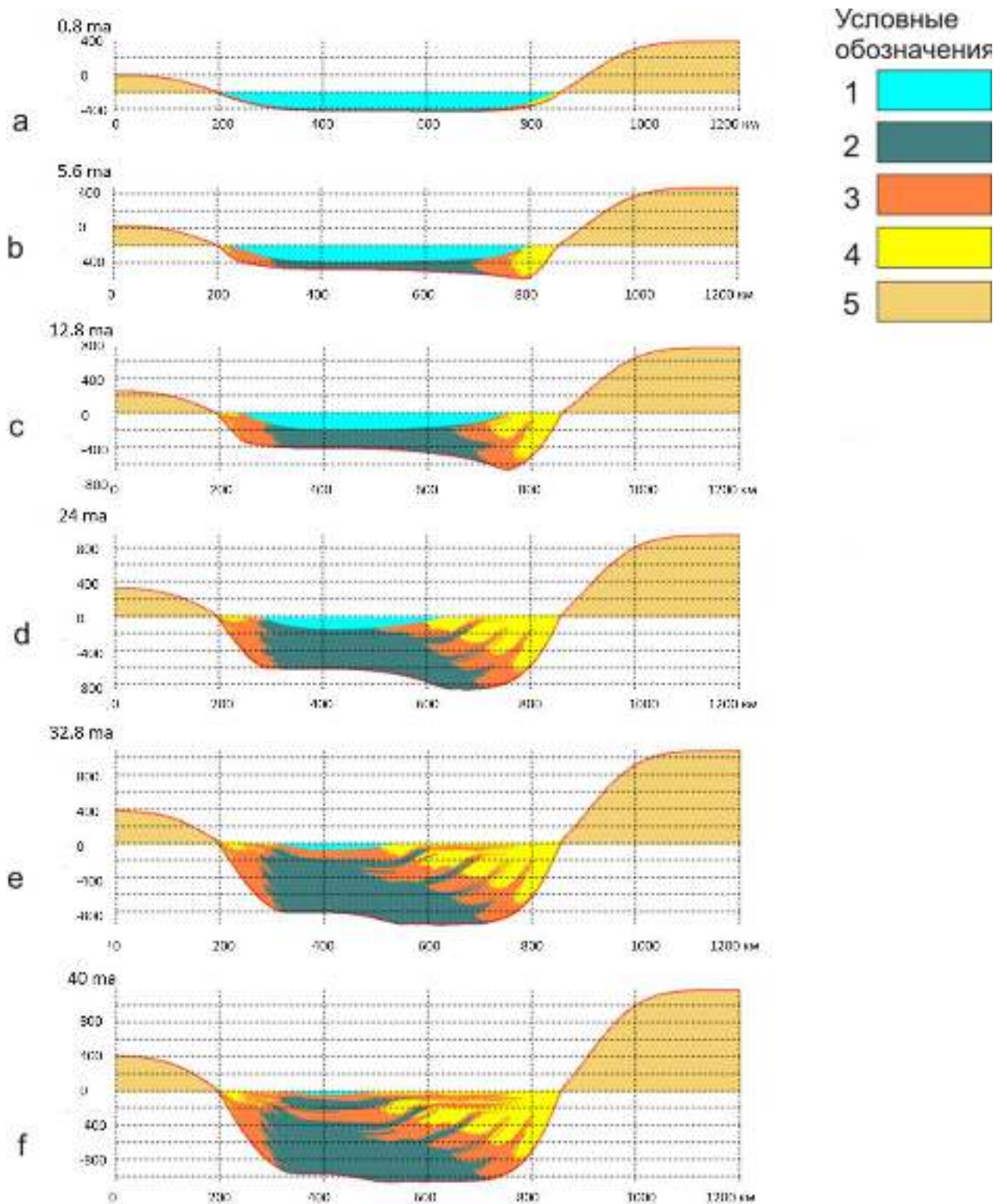


Рисунок 4.8 Вариант расчета эволюции заполнения осадочного бассейна комплексом клинформ. Стадии: а – 0.8 млн. лет, б – 5.6 млн. лет, с – 12.8 млн. лет, д – 24 млн. лет, е – 32.2, ф – 40 млн. лет. Условные обозначения: 1 – вода, 2 – преимущественно глинистые отложения, 3 – преимущественно алевролитовые отложения, 4 – преимущественно песчаные отложения, 5 – возвышенности, служащие источником сноса осадочного материала.

Результирующее состояние бассейна, которое несколько отличается от приведенного на Рисунке 4.8, и которое использовалось для задач аппроксимации

малого числа экспериментально заданных данных с учетом сейсмостратиграфической модели, показано на рисунке 4.9.

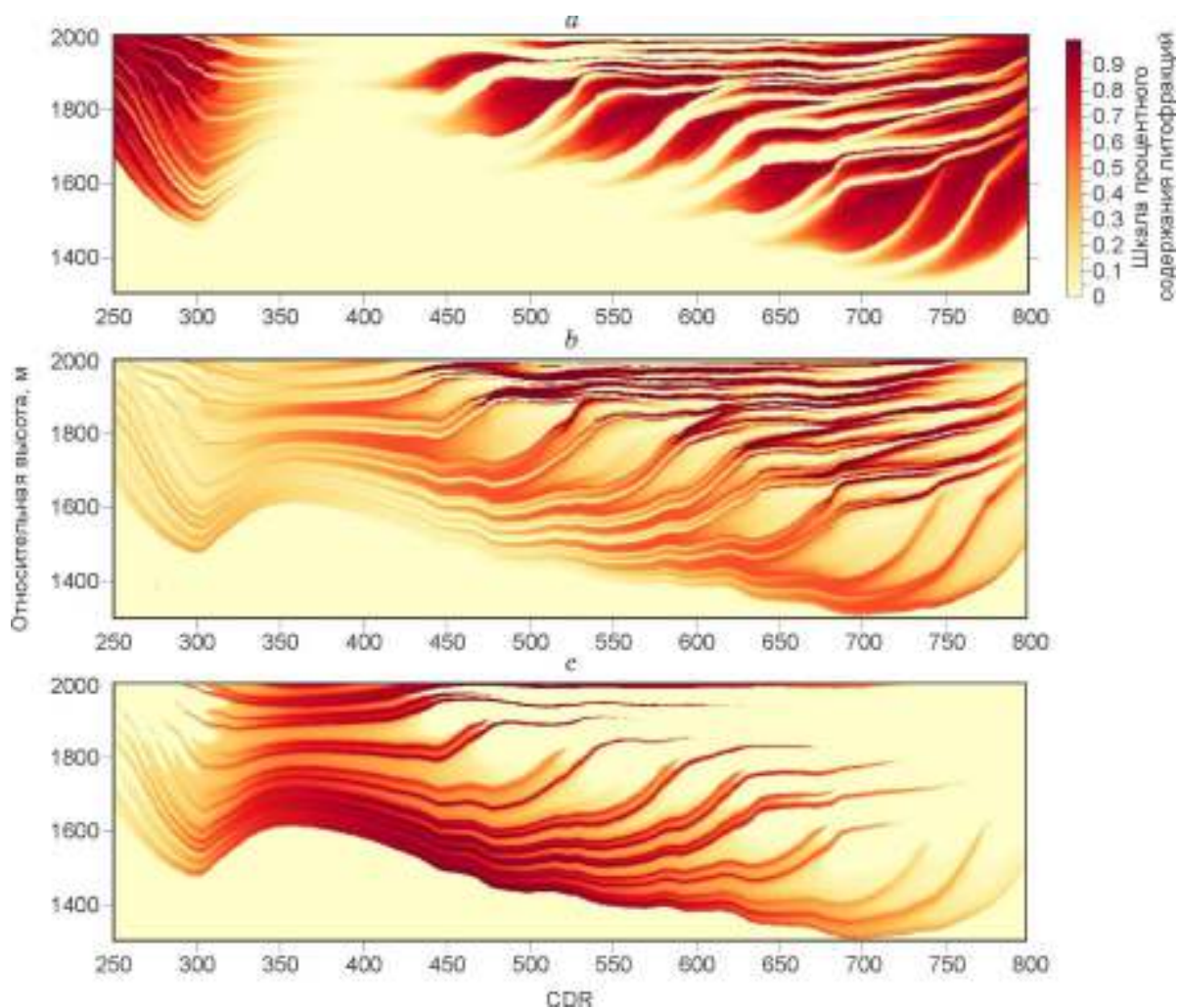


Рисунок 4.9 Процентная доля фракций разреза осадочного бассейна. а – песков, б – алевритов, с – глин.

Как видно из рисунка 4.9, фациальная структура осадочной толщи имеет сигмоидный облик, характерный для клиноформного комплекса Западной Сибири. Распределение фракций имеет закономерный характер: преимущественно глинистые отложения формируются в центральной части, тогда как пески тяготеют к бортам бассейна. По мере обмеления морского бассейна, в связи с заполнением его осадками, песчанисто-алевритовые фракции распространяются в его центральную часть. Асимметрия структуры обусловлена заданным неодинаковым сносом слева и справа. Каждая из осадочных фракций характеризуется значениями плотности и скорости распространения продольных

волн. При этом, в зависимости от давления вышележащих толщ, за счет уплотнения осадков эти параметры меняются.

#### 4.4.3 Примеры использования сеймостратиграфической модели

На основании распределения фракций, было получено распределение в разрезе плотности осадков и скорости прохождения продольных волн и сгенерирован синтетический сейсмический разрез – рисунок 4.10. Этот разрез позволил создать непрерывную сеймостратиграфическую модель среды.

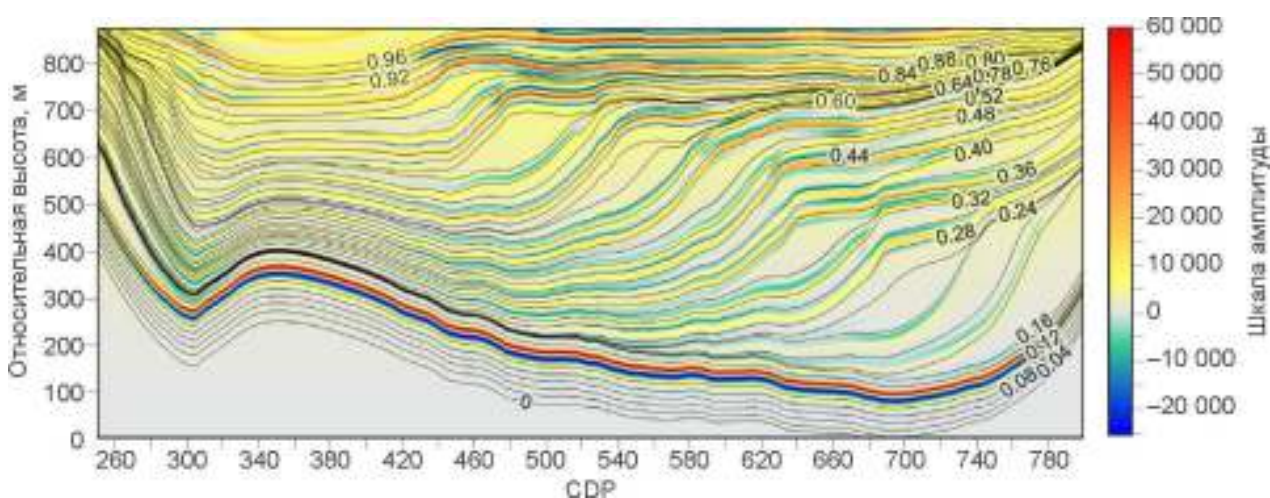


Рисунок 4.10 Синтетический сейсмический разрез и линии уровней сеймостратиграфического параметра/

На приведенном рисунке цветом показана интенсивность сейсмического сигнала, образующая типичную периодическую волновую картину. Изолиниями показана величина рассчитанной сеймостратиграфической функции.

Поскольку скорости нам известны в каждой точке, то не представляет труда перевести данную модель из значений времен, в значения глубин. Интересный результат дает сравнение пространственного поведения функции изохор и литологических фаций, которое показано на рисунке 4.11.

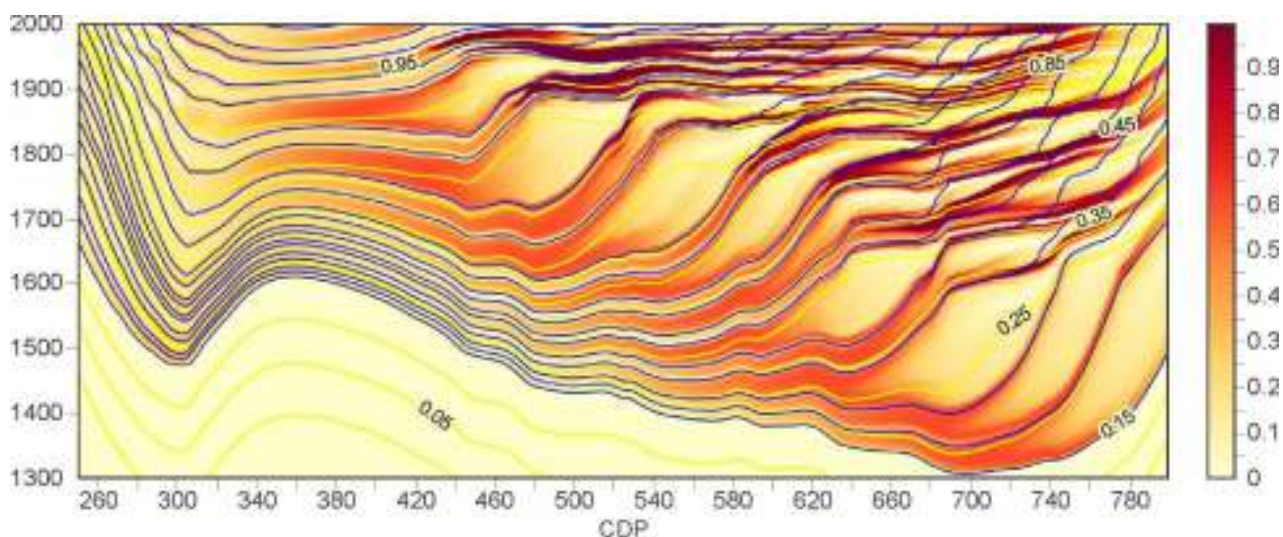


Рисунок 4.11 Глубинный разрез модели. Цветом показано распределение алевритовой фракции, желтыми изолиниями – созданная сейсмостратиграфическая модель, а синими линиями – изохроны.

На этом рисунке видно, что линии изохор местами пересекаются с литологическими границами, особенно это заметно в правой верхней части рисунка. Это несоответствие возрастных и литологических границ обусловлено быстрым накоплением осадков. Одни и те же литологические тела омолаживаются по мере приближения к центральной части бассейна. При дальнейшем заполнении осадками, область существенного несоответствия литологических и хроностратиграфических границ также смещается к центру. Этот рисунок показывает ограниченность возможности использования непрерывной сейсмостратиграфической модели – она согласуется с пространственным распределением именно литологических тел. Однако для значительных частей бассейнов (на рисунке 4.11 эта вся область бассейна кроме левого верхнего угла), литологические границы не имеют временного проскальзывания. Соответственно, наиболее типичной является ситуация, когда конструируемые нами модели, основанные на сейсмических данных, согласуются и с литологическими и с хроностратиграфическими границами.

Одна из задач, которая может эффективно решаться на основе использования обсуждаемой модели - оценка распределения параметров среды. Это показывают результаты следующего вычислительного эксперимента. Осадочная толща сгенерированного синтетического разреза была вскрыта пятью

«скважинами». То есть на разрезе были заданы линии, по которым с шагом в один метр сформирован массив данных координат и значений плотности пород. Одна из скважин вскрыла лишь половину разреза осадочной толщи. Эта ситуация и результаты ее интерпретации представлены на рисунке 4.12.

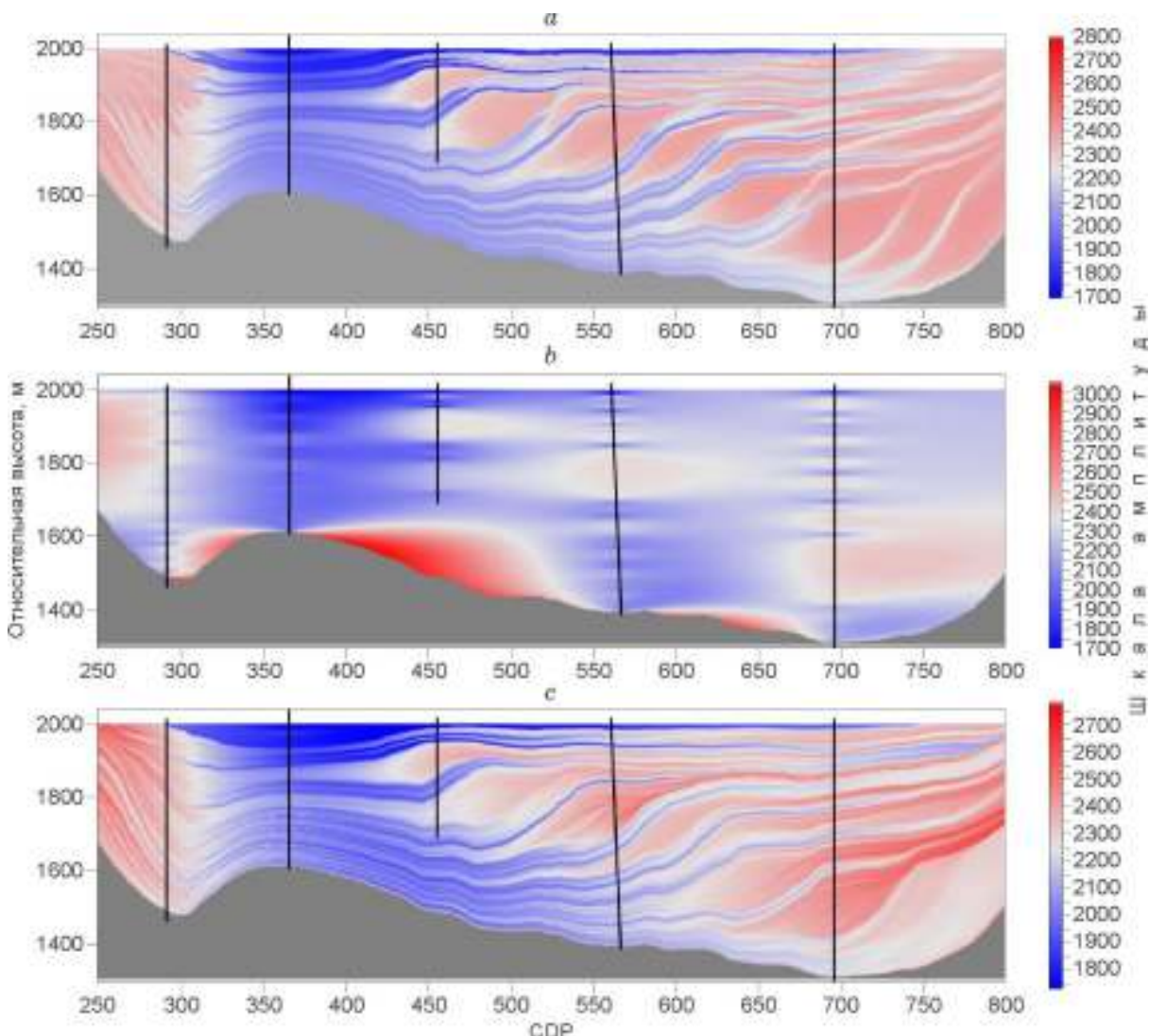


Рисунок 4.12 Пример построения разрезов распределения плотности пород по редким скважинным данным в осадочной толще. Тонкие черные линии – «скважины». а – истинное распределение плотности, b – распределение плотности, построенное только по «скважинным» данным без использования сейсмостратиграфической модели, с – распределение плотности, построенное по «скважинным» данным с использованием сейсмостратиграфической модели.

Тонкими черными линиями показано положение скважин. Точное распределение плотности осадочных пород тестового разреза приведено на рисунке 4.12а. Два других фрагмента - 4.12b и 4.12c построены по результатам восстановления распределения плотности, основанных на одних и тех же данных малого числа скважин. Разрез 3.12b построен путем сплайн-аппроксимации

точечных данных  $p(x_i, z_i)$ , где  $x, z$  – переменные, выражающие удаление по профилю и, глубину непосредственно в пространстве  $(x, z)$ . Представленный на рисунке 3.12с разрез был предварительно построен так же сплайн-аппроксимацией, но в пространстве  $(x, S(\Omega))$ , а затем трансформирован в область привычных координат – удаление, глубина. Полученные результаты отличаются весьма существенно, построение и учет непрерывной сейсмостратиграфической модели позволил приблизить получаемую картину распределения плотности к её истинным значениям. Она смотрится адекватной к заданному распределению плотности, а также имеет в 2.3 раза меньшую среднеквадратическую погрешность  $74 \text{ кг/м}^3$  против  $169 \text{ кг/м}^3$ .

#### **4.5 Возможность учета отражающих горизонтов, прослеженных по фазовым особенностям при построении сейсмостратиграфических моделей**

Одной из проблем рассматриваемой модели является априорная горизонтальность сейсмостратиграфических уровней на её нижней и верхней границах. Горизонтальность является следствием ограничения на вид линии оптимальной траектории, которая по условию решаемой задачи соединяет угловые точки  $(t_i^{\min}, t_{i+k}^{\min})$  с  $(t_i^{\max}, t_{i+k}^{\max})$ . Это может приводить к нежелательному искажению структурной интерпретации разреза в области времен/глубин близких к максимальным или минимальным значениям. Одним из способов устранения данного нежелательного эффекта является априорное задание нескольких сейсмических горизонтов на разрезе, построенном по выраженным фазовым особенностям и использованием этих горизонтов в качестве ограничивающих (краевых) условий для нахождения линии оптимального сопоставления временных областей различных трасс. Этот же способ служит простым и эффективным инструментом редактирования непрерывных сейсмостратиграфических моделей, также он позволяет учесть любые, ранее выполненные трассировки отражающих горизонтов во вновь создаваемых моделях. По существу, он позволяет ввести требование – прохождение изоуровневой поверхности через некоторые заданные точки. На



Рисунке 4.13 приведен пример планшета меры различия пары временных трасс, на каждой из которых задано положение двух отражающих горизонтов. Белым цветом показана область, где недопустимо прохождение линии оптимальной траектории.

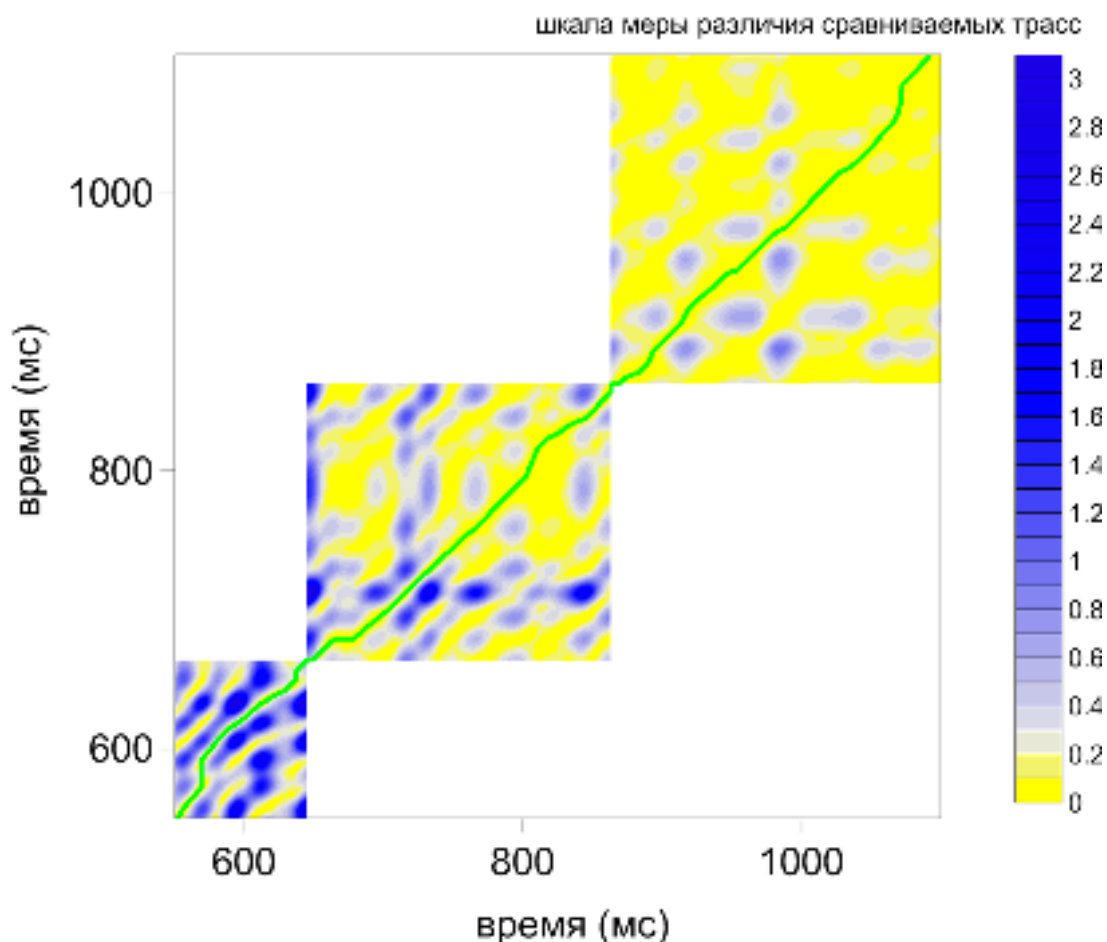


Рисунок 4.13 Планшет сопоставления пары временных трасс с априорно заданным положением двух сейсмических горизонтов.

Поскольку эта линия, должна строго проходить через заданные сейсмические горизонты, для двух имеющихся в данном случае горизонтов, область допустимого положения этой линии сужается до точки, что обеспечивает получение требуемого решения. На следующем примере – Рисунок 4.14 показано, как изменяется вид отдельных сеймостратиграфических уровней в зависимости от априорного заданных горизонтов.

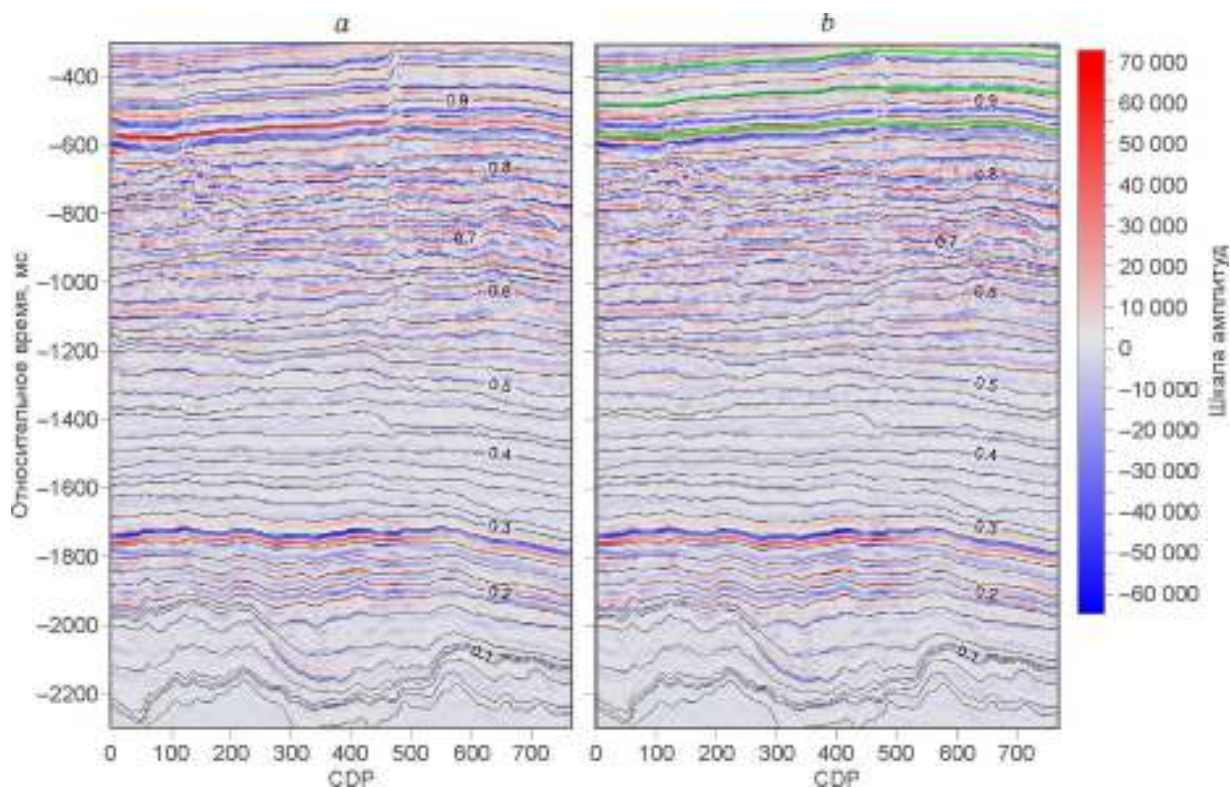


Рисунок 4.14 Результат построения непрерывной сейсмостратиграфической модели. а – без учета априорно заданных горизонтов, б – с учетом трех априорно заданных горизонтов (верхняя часть разреза).

В верхней части разреза были заданы три горизонта (они показаны яблочно-зеленым цветом), которые ограничивают возможность построения модели в данной области. Здесь же в районе 450-470 трасс разреза находится узкая вертикальная область хаотических отражений (так могут проявляться речные долины, или другие линейные аномалии рельефа и ВЧР, которые пересекает сейсмический профиль). Эта зона хаотических отражений ухудшает сейсмостратиграфическую модель в верхней части разреза. Благодаря заданию априорных горизонтов удалось существенно уменьшить данный негативный эффект.

То, что предлагаемое решение создания непрерывных сейсмостратиграфических моделей допускает учет горизонтов, выделенных в рамках традиционных технологий на основе трассировки фазовых особенностей, показывает, что оба эти подхода не конкурируют, а дополняют друг друга.

#### 4.6 Оценка качества прослеживания отдельных горизонтов

Рисунок 4.6 демонстрирует простой факт – если горизонт проводить через каждую фазовую особенность волнового поля, то их будет слишком много и их рациональная интерпретация окажется невозможной. В разделе 4.3 рассмотрена возможность выборочной визуализации привязанных к определенным фазам горизонтов. Другая возможность – использование некоторого формального критерия оценки качества фазовых трассировок, ранжирование всех горизонтов в соответствии с данным критерием. Затем возможно решение двух задач – выбор наилучших, с точки зрения принятого критерия, горизонтов и разделение разреза на комплексы отложений, для которых характерно различное качество трассировки сейсмических горизонтов.

Следующие свойства, вычисляемые для отдельных фазовых трассировок, могут быть использованы при конструировании критериев оценки их качества:

1. Диапазон изменения значения стратиграфического параметра при не смещении горизонта с заданной фазы.
2. Интегральное значение функции различия по горизонту.
3. Средняя по модулю амплитуда волнового поля по линии горизонта.

#### 4.7 Построение согласованных сейсмостратиграфических моделей для групп профилей

Способ, описанный в разделе 4.2 позволяет получать модели для отдельных разрезов МОГТ. Группа из связанных сейсмических профилей (имеющих общие точки пересечения, используя которые, из любой точки этой системы можно попасть в любую другую точку этой же системы), после построения для каждого из разрезов сейсмостратиграфической модели, в общем случае, будет иметь несогласованные параметры. Такая несогласованность проявляется в различиях значений этих моделей для трасс в местах пересечения разрезов. В данном случае можно ставить задачу построения или калибровки этих моделей таким образом, чтобы данного несоответствия не возникало, или оно было минимизировано. Аналогичная постановка возникает в задаче увязки разрезов по крестовым точкам [Муклыгин, Лапковский, 1985].

В основе построения взаимно согласованных моделей пересекающихся разрезов лежит процедура взаимного отображения значения сеймостратиграфического параметра пересекающихся профилей в их общих точках.

В некоторой точке  $p$ , лежащей на горизонтальной плоскости, пересекаются  $i$ -тый и  $j$ -тый профили. Первый из этих профилей будем считать эталонным, и заданные на нем величины остаются неизменными, второй профиль – подгоняемый, для него необходимо добиться полного совпадения или достаточной близости сеймостратиграфической функции в точке пересечения. Пусть  $A(t_i)$  и  $A(t_j)$  - функции от времени значения амплитуд волнового поля для этих профилей в точке  $p$ , а  $S(t_i)$  и  $S(t_j)$  – изначально вычисленная для данных разрезов сеймостратиграфическая функция. Задача состоит в том, чтобы внести некоторые поправки в величины стратиграфического параметра этих профилей (на основе вычисления функций поправок в отдельных точках) и получить новые значения.

$S(t_i) = S(t_j) + d(p; t_j)$ , где  $d(p; t_j)$  - функция поправки вычисленная разных значений времени  $j$ -того профиля в точке  $p$ .

Задача решается в два шага:

1. Оптимальным образом совмещаем временные графики амплитуд. То есть, получаем двумерную функцию взаимного различия для  $A(t_i)$  и  $A(t_j)$  на планшете Жековского и строим линию оптимального сопоставления временных областей двух трасс пересекающихся разрезов.
2. Построенная линия оптимального сопоставления временных областей для  $i$ -того и  $j$ -того профиля на основании точки их пересечения позволяет получить функцию  $t_i = \varphi(t_j)$  и вычислить функцию поправки для стратиграфического параметра  $j$ -того разреза

$$d(p; \varphi(t_j)) = S(t_i) - S(\varphi(t_j)), \quad (4.17)$$

Поскольку стратиграфический параметр на  $j$ -том разрезе является однозначной и неубывающей функцией от времени, уравнение (4.17) можно записать как функцию поправки от стратиграфического параметра для  $j$ -того профиля.

$d(p; \varphi(t_j)) = f(S_j)$ . Соответственно можно пересчитать сеймостратиграфическую модель для всего  $j$ -того разреза. Если для одного подгоняемого разреза имеем несколько точек пересечения с эталонными разрезами, то вычисляем функции поправок для каждого пересечения, а далее можем поступать одним из двух способов:

1. Вычисляем среднюю функцию поправки по всем точкам пересечения, тогда строгого совпадения значений сеймостратиграфических функций пересекающихся профилей мы не получим (решение будет приближенным).
2. Результирующую функцию поправки вычисляем интерполяцией (в простейшем случае линейной) между теми оценками, которые получены для отдельных точек пересечения.

Основное достоинство согласованных моделей состоит в том, что одному значению сеймостратиграфического параметра на разных разрезах соответствуют близкие по стратиграфическому положению горизонты.

Возможность корректировать модель по секущим разрезам, позволяет подготовить качественные и согласованные данные для построения различных карт ( $t_0$ , структурных и карт отражающих горизонтов). Рисунок 4.15 показывает две карты, построенные для сети профилей МОГТ по значению сеймостратиграфической функции 0.4. На первой из них – рисунок 4.15а, стратиграфические параметры отдельных разрезов не согласованы друг с другом. Вторая карта – рисунок 4.15б, получена по данным, согласованным в точках пересечения профилей, здесь основные неоднородности поля времени обусловлены не геометрией сейсмических профилей, а реально существующим структурным поднятием в центральной области карты.

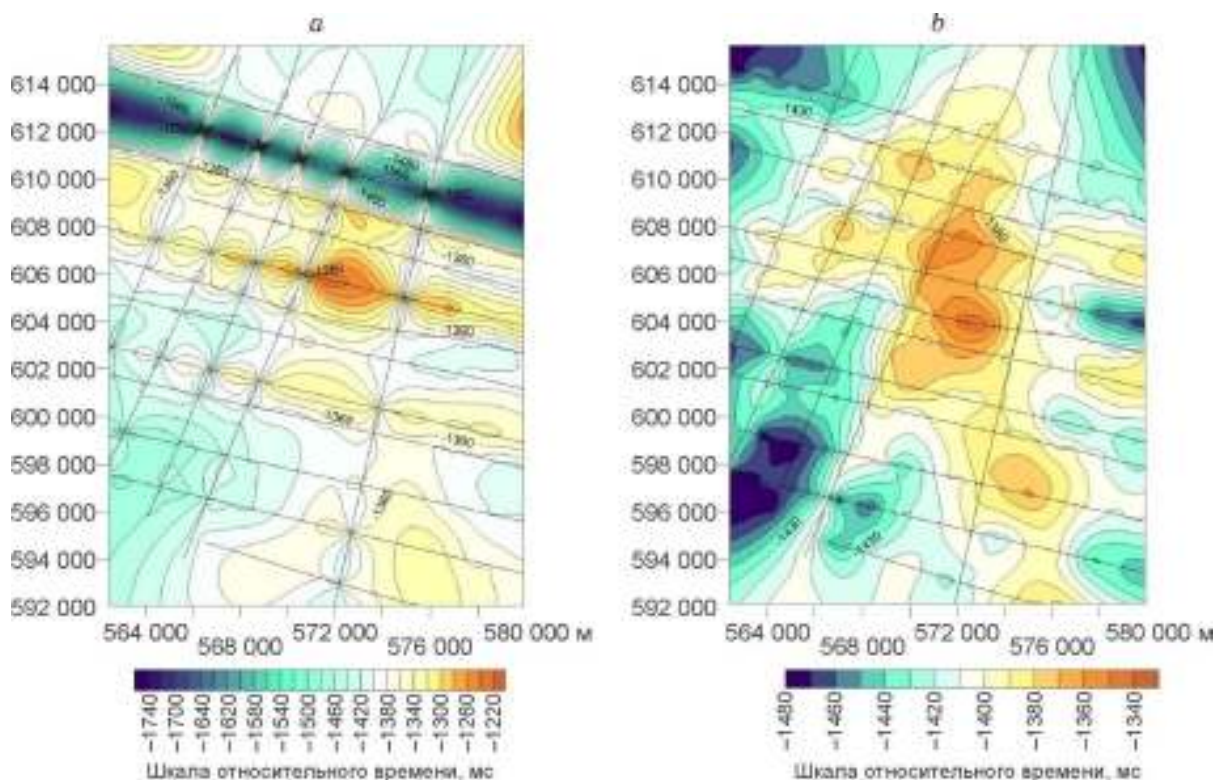


Рисунок 4.15 Карты времени регистрации для сейсмостратиграфической границы с параметром 0.4 в относительной шкале времен. а – построена без согласования моделей по крестовым точкам, б – построена с согласованием моделей по крестовым почкам. Тонкие черные линии – система профилей МОГТ.

Хочу особенно подчеркнуть тот факт, что карта, показанная на Рисунке 4.15b получена полностью в автоматическом режиме, как результат последовательной работы нескольких вычислительных программ.

#### 4.8 Построение трехмерных сейсмостратиграфических моделей для связной системы 2D профилей и кубов

Конечным результатом структурной и стратиграфической интерпретации отдельных сейсмических разрезов может быть создание объединенной трехмерной модели и ее анализ. В настоящее время существуют технологии построения квази-трехмерных моделей волновых полей на основе интерполяции отдельных двумерных разрезов. Для скважинных данных, такие технологии реализованы во ВСЕГЕИ [Технология автоматизированной корреляции данных ГИС, 2012].

Однако, интерполяция волнового поля, с сохранением его фазовых особенностей, более сложный процесс по сравнению с созданием трехмерной

сейсмостратиграфической модели путем аппроксимации данных с отдельных разрезов. Для создания модели волнового поля обычно приходится предварительно протрассировать несколько узнаваемых горизонтов, и построить двумерные модели (карты) этих горизонтов. В противном случае не гарантировано, что не будут при интерполяции соотноситься фрагменты разрезов, имеющих разные, вплоть до противоположных фаз. Сейсмостратиграфическая функция не периодична, она монотонна, соответственно аппроксимировать ее из двумерных разрезов на трехмерную сеть можно, без таких дополнительных построений. Напротив, предварительное создание трехмерной сейсмостратиграфической модели, может позволить использовать ее для создания качественной 3D модели волнового поля.

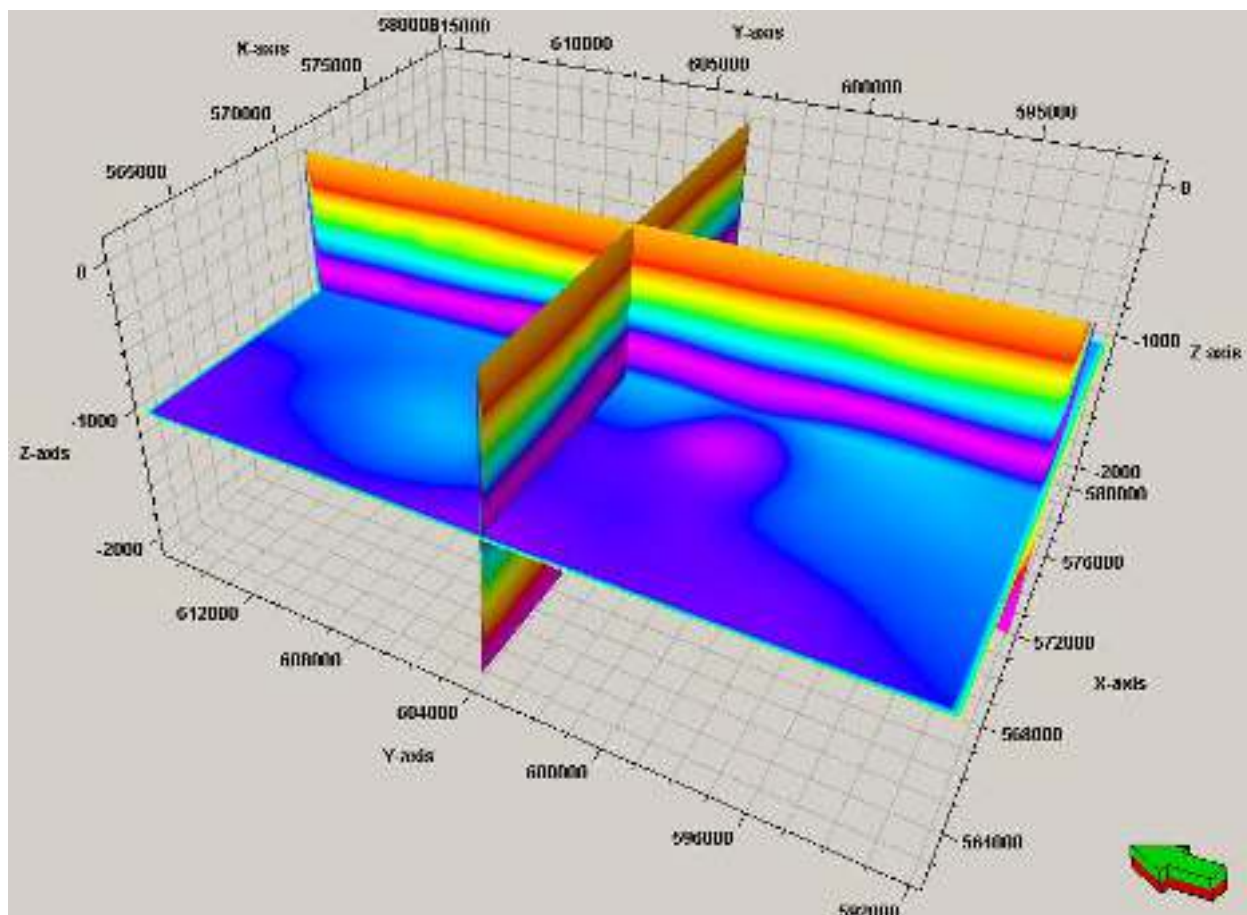


Рисунок 4.16 Пример вывода в виде проекций сечений трехмерной модели сейсмостратиграфической функции, построенной по 17-ти взаимно согласованным разрезам.

На рисунке 4.16 представлен пример трехмерной сейсмостратиграфической модели, созданной на основе аппроксимации предварительно рассчитанных двумерных согласованных моделей. Здесь при визуализации слоистой структуры объекта использована палетка с повторяющимися цветами для различных значений трехмерной функции.

#### **4.9 Решение задачи межскважинной корреляции пластов с использованием непрерывной сейсмостратиграфической модели**

Если вернуться к задаче, которой полностью посвящена вторая глава данной работы – стратиграфическая корреляция разрезов скважин, то можно отметить следующее. Построение межскважинной корреляции пластов обычно неоднозначно, использование сейсмических данных, позволяет существенно понизить неопределенность решения. Новые методы стратиграфии – сиквенсстратиграфия, сейсмостратиграфия, использующие возможности непрерывного прослеживания геологических границ на закрытых территориях, обеспечиваются данными сейсморазведки. При обсуждении оптимизационных методов корреляции разрезов скважин во второй главе, не шла речь об использовании сейсмических данных, хотя такое дополнение результатов исследования скважин сейсмической информацией логично и естественно. Помимо амплитудных, фазовых, частотных и энергетических характеристик волнового поля, которые на скважины можно перенести с сейсмических разрезов, можно также перенести сейсмостратиграфический параметр в виде каротажной кривой. Единственным условием выполнения данной операции является наличие для объекта качественной скоростной модели. Создание таких моделей является рутинной операцией в распространенных индустриальных интерпретационных пакетах. Это может позволить повысить достоверность и точность последующей стратиграфической корреляции.

#### **Выводы:**

1. Непрерывная сейсмогеологическая модель сейсмического разреза (или куба) является параметризацией пространства, которая позволяет каждой точке



разреза приписать значение вещественного параметра и ввести для произвольных точек отношения выше-ниже (больше-меньше) и эквивалентности. Значение параметра показывает положение точек разреза в сеймостратиграфической шкале. Слово «непрерывная» говорит о том, что параметризованы все точки разреза и для любого значения параметра в допустимом интервале, в пространстве разреза найдется непустое множество точек с соответствующим его значением. В практическом отношении непрерывная сейсмогеологическая модель позволяет получать любое количество отражающих горизонтов, и проводить горизонт через любую выбранную точку разреза, что имеет важное значение при структурной интерпретации сейсмических данных.

2. Процедура построения непрерывной сеймостратиграфической модели основана на решении оптимизационной задачи – нахождения интервальных оптимальных отображений пар сейсмических трасс.
3. Непрерывная сеймостратиграфическая модель может успешно использоваться для аппроксимации разрозненных скважинных данных, для получения пространственного распределения физических и химических характеристик разреза с учетом слоистой структуры.
4. Третьим защищаемым положением работы является концепция непрерывной сеймостратиграфической модели для разрезов или кубов МОГТ, а также метод создания непрерывных сеймостратиграфических моделей, который обеспечивает высокоточную количественную параметризацию разрезов или кубов МОГТ на основе попарного оптимального по заданному временному или глубинному интервалу сопоставления сейсмических трасс.

## ГЛАВА 5 МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СТРУКТУРНЫХ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

*Кто не строит карту, тот не геолог.*

*Христиан Леопольд фон Бух*

### 5.1 Некоторые сведения о кригинге и многомерных сплайнах

Пространственные, структурные и параметрические модели строятся для всестороннего описания и характеристики осадочных толщ, также они используются при решении задач бассейнового моделирования и количественного прогноза нефтегазоносности [Волков, 1980; Дюблор, 2002; Гладков, 2006; Развожаева и др., 2017].

Наиболее эффективные и популярные методы аппроксимации, применяемые при моделировании осадочных толщ, основаны на геостатистическом подходе (различные варианты кригинга) и методы сплайн-аппроксимации. В реализации этих методов в *GridBuilder* и *GridMaster* они обладают возможностью построения карт, осложненных большим числом разрывных нарушений. Общим, для всех вариантов постановки задачи является то, что в двумерной ограниченной области  $\Omega$  на множестве хаотически расположенных точках  $P_1, P_2, \dots, P_n$ , известны значения некоторой функции  $z_1, z_2, \dots, z_n$ , и следует построить приближение этой функции.

#### 5.1.1 Кригинг

В настоящее время кригинг объединяет целое семейство методов построения и оценки числовых моделей геологических поверхностей. Особенно успешное применение различных вариантов кригинга проводится для оценки неопределенностей, рисков с ней связанных и вклада различных факторов, влияющих на неопределенность. Это обусловлено стохастической природой кригинга. В кригинге исходные данные рассматриваются как реализация случайного и в некотором смысле, стационарного процесса. При этом

стационарность может пониматься по-разному [Дюблор, 2002; Демьянов, Савельева, 2010]. Но с точки зрения обоснования решения кригинга, наиболее значимым является предположение о стационарности ковариации переменной. То есть, предположение, что величина ковариации зависит только от расстояния между измерениями (для анизотропных моделей, также и от направления между измерениями). Это также предположение о том, что кригинг должен приводить к несмещенной оценке оцениваемой переменной, в итоге приводит к системе линейных уравнений, решение которой и позволяет получить оценку среднего для соответствующего случайного процесса. Теоретические основы геостатистики дал французский математик Жорж Матерон [1968], а одним из первых ее применил Д.Г. Криге [1968] при вычислении запасов золоторудных месторождений в Южной Африке. Собственно, в его честь данный метод построения карт и моделей геологических поверхностей и получил свое название.

Коль скоро, речь коснулась названия метода, следует заметить, что в русскоязычной литературе употребимы два варианта – «кригинг» и «крайгинг». Сторонники первой версии названия подчеркивают, что геолог, в честь которого назван метод, этнический потомок голландских поселенцев и звали его Daniel Gerhardus Krige. Соответственно, в русском языке, надо писать «кригинг». Однако, есть логичное обоснование и у второго варианта. Метод в мировой литературе получил название «kriging». То есть с фамилией Южно-Африканского геолога поступили как с английским глаголом и добавили к нему инговое окончание. Такой английский глагол в русском должен писаться и произноситься как «крайгинг». Я полагаю, что оба эти варианта названия допустимы, но употреблять буду первое из них.

В настоящее время методы кригинга широко используется при построении и оценке моделей в нефтяной геологии. Центральным для кригинга является выражение точечного значения моделируемой переменной через взвешенную сумму известных значений

$$z(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i \quad (5.1)$$

Задачей, собственно, является оценка неизвестных весов. Приведенное выражение описывает простой кригинг (simple kriging), а также является частью

более сложных моделей кригинга, таких как обычный кригинг (ordinary kriging), универсальный кригинг (universal kriging), кригинг с внешним дрейфом, ко-кригинг, совместный и совместный множественный кригинг. Систематическое описание методов кригинга и его приложений дано в частности в работах [Дюблор, 2002; Wackernagel, 2003; Caers, 2005; Демьянов, Савельева, 2010]. Далее приводятся некоторые теоретические сведения и описание тех методов кригинга, которые реализованы в авторском продукте *GridBuilder-GridMaster*.

Основополагающим для методов кригинга является понятие вариограммы – функции, количественно описывающей пространственную изменчивость и пространственную корреляцию переменной. Для изотропных моделей вариограмма определяется как половина среднего значения дисперсии, зависимой от расстояния между сравниваемыми значениями измерений – (5.2)

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[(z(x) - z(x+h))^2] \quad (5.2)$$

Здесь  $z(x)$  – значение переменной в некоторой точке  $x$ , а  $z(x+h)$  – в точке, которая удалена от точки  $x$  на расстояние  $h$ . Для анизотропных вариограмм, помимо расстояния, которое разделяет точки, учитывается и направление, по которому они разделены.

Обычно используются некоторые приближения или модельные вариограммы, описывающие реальную изменчивость данных. Вариограммы обычно задаются их типом и некоторыми управляющими параметрами:

$C_0$  – эффект самородка (nugget effect), выражает непрерывность или возможную изменчивость переменной при нулевом смещении,

$C_0+C_1$  – порог (sill) определяет максимально возможный уровень изменчивости,

$R$  – радиус (range) определяет расстояние на котором сохраняется пространственная зависимость данных. Смысл этих параметров пояснен на отредактированном скриншоте из *GridBuilder* рисунке 5.1.

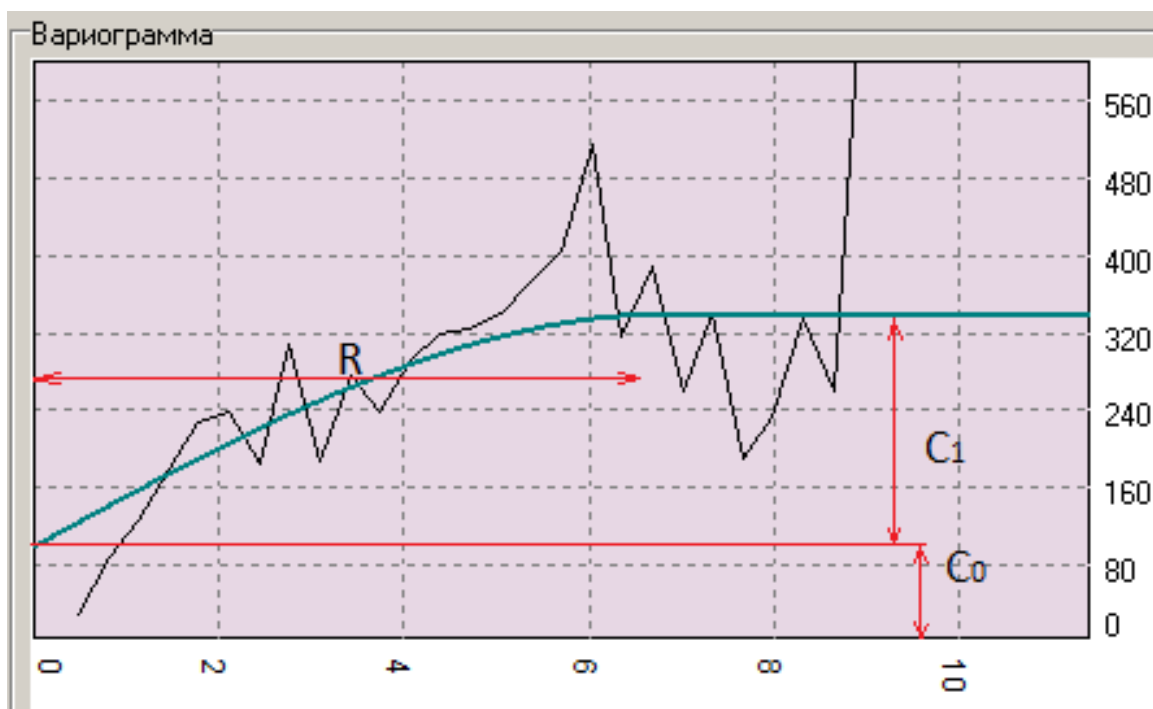


Рисунок 5.1 Модельная вариограмма (бирюзовая линия), построенная по экспериментальным данным (черная линия) и ее основные параметры –  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $R$ .

В реализации кригинга мы использовали следующие виды вариограмм, из которых могут также собираться композитные вариограммы:

1. Линейная  $\gamma(h) = C_1 h / R + C_0$ , если  $h \leq R$ , иначе

$$\gamma(h) = C_0 + C_1,$$

2. Кубическая  $\gamma(h) = C_1(7p^2 - \frac{35}{4}p^3 + 3.5p^5 - 0.75p^7) + C_0$ , если  $h \leq R$ ,

иначе

$$\gamma(h) = C_0 + C_1,$$

3. Сферическая  $\gamma(h) = C_1(3h/2R) - h^3/(2R^3) + C_0$ , если  $h \leq R$ , иначе

$$\gamma(h) = C_0 + C_1,$$

4. Пентавариограмма

$$\gamma(h) = C_1\left(\frac{22}{3}p^2 - 33p^4 + \frac{77}{2}p^5 - \frac{33}{2}p^7 + \frac{11}{2}p^9 - \frac{5}{6}p^{11}\right) + C_0, \quad \text{если}$$

$$h \leq R, \text{ иначе } \gamma(h) = C_0 + C_1,$$

5. Экспоненциальная  $\gamma(h) = C_1(1 - e^{-p}) + C_0$ ,

6. Гауссова  $\gamma(h) = C_1(1 - e^{-p^2}) + C_0$ ,
7. Обобщенная Коши  $\gamma(h) = C_1(1 - p^{-(1+p^2)}) + C_0$ ,
8. Степенная  $\gamma(h) = C_1(p^a) + C_0$ , здесь  $0 < a < 2$  дополнительный параметр вариограммы,
9. Логарифмическая Де Вийса  $\gamma(h) = C_1 \lg(p) + C_0$
10. Убывающего синуса  $\gamma(h) = C_1(1 - \frac{\sin(wh)}{wh}) + C_0$ , здесь  $w$  – частотная характеристика вариограммы. В отличие от других моделей, для убывающего синуса возможно получение значений вариограммы больше, чем ее порог (sill), по мере увеличения расстояния, модель приближается к порогу с двух сторон – сверху и снизу.

В приведенных выражениях  $p = h/R$ .

В простом кригинге, значения картируемой переменной определяется по выражению (5.1), то есть как взвешенная величина от уже известных значений. Веса  $\lambda_{ki}$  участвующие в оценке значения для  $k$ -той точки (произвольная точка области оценки) определяются из решения системы линейных уравнений.

$$\begin{pmatrix} \gamma(0) & \gamma(h_{12}) & \dots & \gamma(h_{1n}) \\ \gamma(h_{21}) & \gamma(0) & \dots & \gamma(h_{2n}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \gamma(h_{n1}) & \dots & \dots & \gamma(0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \dots \\ \lambda_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma(h_{1k}) \\ \gamma(h_{2k}) \\ \dots \\ \gamma(h_{nk}) \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

Этот вид кригинга, используется не часто, он предполагает, что среднее значение моделируемой переменной постоянно и известно.

Система обычного кригинга выводится из условия минимизации дисперсии отклонений и несмещенности оценки кригинга, она записывается как

$$\begin{pmatrix} \gamma(0) & \gamma(h_{12}) & \dots & \gamma(h_{1n}) & 1 \\ \gamma(h_{12}) & \gamma(0) & \dots & \gamma(h_{2n}) & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \gamma(h_{1n}) & \gamma(h_{2n}) & \dots & \gamma(0) & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \dots \\ \lambda_n \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma(h_{1k}) \\ \gamma(h_{2k}) \\ \dots \\ \gamma(h_{nk}) \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

При обычном кригинге предполагается, что моделируемая переменная имеет постоянное во всей области среднее, но оно не известно.

При универсальном кригинге модель оцениваемой переменной включает в себя линейный тренд на фоне которого возникает ее случайная реализация. Система линейных уравнений для универсального кригинга записывается как

$$\begin{pmatrix} \gamma(0) & \gamma(h_{12}) & \dots & \gamma(h_{1n}) & 1 & x_1 & y_1 \\ \gamma(h_{21}) & \gamma(0) & \dots & \gamma(h_{2n}) & 1 & x_2 & y_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \gamma(h_{1n}) & \gamma(h_{2n}) & \dots & \gamma(0) & 1 & x_n & y_n \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 \\ x_1 & x_2 & \dots & x_n & 0 & 0 & 0 \\ y_1 & y_2 & \dots & y_n & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \dots \\ \lambda_n \\ \mu \\ \mu_x \\ \mu_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma(h_{1k}) \\ \gamma(h_{2k}) \\ \dots \\ \gamma(h_{nk}) \\ 1 \\ x_k \\ y_k \end{pmatrix} \quad (5.5)$$

Помимо значений переменной, которые минимизирует дисперсию отклонений, кригинг позволяет получить и собственно значения этой дисперсии. Такой вид анализа иногда называют кригинг ошибок. В зависимости от модели тренда для кригинга ошибок, также можно говорить о простом, обычном и универсальном кригинге.

Для обычного кригинга дисперсия ошибки оценивается как

$$\sigma_{ok}(x_k) = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \dots \\ \lambda_n \\ \mu \end{pmatrix}' \begin{pmatrix} \gamma(h_{1k}) \\ \gamma(h_{2k}) \\ \dots \\ \gamma(h_{nk}) \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5.6)$$

Было показано [Chiles, Delfiner, 1999], что для непрерывных и одномодальных распределений, доверительные интервалы могут быть определены через дисперсию случайной переменной. Уникальная особенность кригинга – возможность оценивать собственную вероятную погрешность, выделяет этот метод аппроксимации геологических переменных среди всех

других, применяемых в геологии методов. Зная кригинг модель переменной (ожидаемое пространственное распределение средних значений случайной величины) и оценку возможной вариативности этой величины, можно получать бесконечное число статистически равнозначных реализаций. Эта возможность породила новое направление, оценки неопределенности и связанных с ней рисков разведки и эксплуатации месторождений [Chiles, Delfiner, 1999; Дюблор, 2002; Wackernagel, 2003; Демьянов, Савельева, 2010]. Кригинг позволяет делать вероятностную оценку запасов месторождений и вероятностную оценку критически важных подсчетных параметров. Методы геостатистического анализа при оценке запасов нефтяных и газовых месторождений практически стали нормой в практике работы многих нефтяных компаний.

Кригинг ошибок, с оценкой дисперсии по выражению (5.6), является одной из основ при стохастической оценке запасов нефтяных и газовых залежей, реализованной нами в программном продукте Estimo [Конторович, Лапковский, 2011].

Важнейшими свойствами кригинга является то, что он дает несмещенную оценку случайной величины и то, что эта оценка является наилучшей с точки зрения минимизации дисперсии погрешности. Правда, и то и другое достигается только при выполнении условий стационарности и адекватности используемой вариограммы.

### 5.1.2 Многомерные сплайны

Название «сплайн» происходит от слова «**spline**», использовавшегося в диалекте Восточной Англии (Oxford English Dictionary <http://www.oed.com/>). Так чертежники и конструкторы называли гибкую упругую рейку, с помощью которой на чертеже любые точки можно было соединить гладкой красивой линией. Для этого рейка (сплайн) фиксировалась с помощью специальных крепежных устройств (на профессиональном жаргоне «утки», «крысы» или «собаки»). Так работали авиационные и судостроительные конструкторы. Поскольку, находясь под нагрузкой, рейка принимала энергетически наиболее



выгодную форму, то физическая природа сплайна, понималась как форма, отвечающая минимуму энергии упругого изгиба тонкого однородного стержня. Математическое понятие сплайна в 1946 году ввел Айзек Шонберг [Schoenberg, 1946 a, b], как функцию одной переменной, гладко склеенной из кусков кубических многочленов. Помимо простоты представления в виде кусочно-полиномиальных функций, сплайн  $\sigma(x)$  обладал и интегральным свойством – он минимизировал функционал.

$$I_2(\sigma) = \int_{-\infty}^{+\infty} [\sigma''(x)]^2 dx \rightarrow \min \quad (5.7)$$

При малых углах изгиба, функционал (5.7) с точностью до множителя соответствует потенциальной энергии изгиба упругого однородного стержня. Кубические и некубические сплайны получили широкое распространение в задачах интерполяции и аппроксимации функций [Алберг, Нильсон, Уолш, 1972; Василенко, 1983; Игнатов, Певный, 1991; Ашкеназы, 2003; Квасов, 2006 и другие]. Для двумерных задач на равномерных сетках, были разработаны методы приближения на основе бикубических сплайнов. Аппроксимация данных заданных на нерегулярных двумерных или многомерных системах наблюдения осуществляется с помощью базисных сплайнов (сокращенно В-сплайны) [Wikipedia, 2018], и сплайнов, выраженных через функции Грина.

Применительно к геологическим задачам, аппроксимация с помощью базисных сплайнов получила развитие во многом благодаря работам школы Тюменских геологов, которую создал Андрей Михайлович Волков [Волков, 1974; 1980; 1988]. Один из важных результатов, полученных А.М. Волковым и его учениками, состоит в том, что методы аппроксимации, разработанные для непрерывных и гладких функций, удалось адаптировать к сложным геологическим ситуациям. А именно, к построению моделей геологических границ, осложненных поверхностями несогласий и большим числом разрывных нарушений [Волков и др., 1985].

Помимо В-сплайнов многомерные данные могут аппроксимироваться натуральными сплайнами, которые являются решением вариационных задач специального вида и представляются через функции Грина. Теоретические основы этого направления даны в работах [Смоляк, 1970; Harder, Desmarais, 1972,

Василенко, 1983; Игнатов, Певный, 1991]. Физическим аналогом сплайнов этого вида является однородная тонкая упругая изогнутая пластина.

В теории упругости [Ландау, Лифшиц, 1965] показано, что потенциальная энергия изогнутой упругой пластинки описывается выражением

$$U = \frac{D}{2} \iint_{\Omega} \left\{ \left( \frac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma}{\partial y^2} \right)^2 + 2(1-\mu) \left[ \frac{\partial^2 \sigma}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \sigma}{\partial y^2} \right] \right\} dx dy \quad (5.8)$$

Здесь  $D$  – жесткость пластинки,  $\sigma(x, y)$  – функция описывающая форму пластинки,  $\mu$  – коэффициент Пуассона. Для однородной и бесконечно тонкой пластинки минимум функционала (5.8) достигается при минимизации

$$I_2(\sigma) = \int_{\Omega} \left[ \left( \frac{d^2 \sigma}{dx^2} \right)^2 + 2 \left( \frac{d^2 \sigma}{dx dy} \right)^2 + \left( \frac{d^2 \sigma}{dy^2} \right)^2 \right] d\Omega \quad (5.9)$$

И интерполирующий двумерный сплайн определяется как функция, удовлетворяющая двум условиям:

$$\begin{cases} (Pi) = zi, \quad i=1,2,\dots,n, \\ I_2(\Omega) = \min. \end{cases} \quad (5.10)$$

Здесь  $I_m(\sigma)$  – функционал энергетического типа с параметром  $m$ , и в общем виде для многомерных сплайнов он определяется следующим образом

$$I_m(\Omega) = \sum_{|\alpha|=m} \frac{m!}{\alpha!} \int_{\Omega} (D^{\alpha} \sigma)^2 d\Omega = \min \quad (5.11)$$

Здесь, если рассматриваются двумерные сплайны:  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2)$  – пара неотрицательных целых чисел (двойной индекс),

$$|\alpha| = \alpha_1 + \alpha_2,$$

$$\alpha! = \alpha_1! \alpha_2!,$$

$$D^{\alpha} \sigma = \frac{d^{|\alpha|} \sigma}{d^{\alpha_1} x d^{\alpha_2} y} - \text{оператор дифференцирования.}$$

В задачах аппроксимации, когда сплайн поверхность может отклоняться от точек с ее известными значениями, ищется минимум для функционала

$$I_2(\Omega) + \alpha \sum_{i=1}^n [\sigma(P_i) - z_i]^2 \quad (5.12)$$

Здесь  $\alpha$  – параметр сглаживания. При больших значениях этого параметра сплайн приближается к интерполирующему. Параметр сглаживания согласует два противоречивых условия – необходимость быть предельно гладкой поверхностью и при этом, проходить как можно ближе к заданным точкам.

И интерполирующий и сглаживающий сплайн представляется через функции Грина. Для двумерного случая и при  $m=2$ , сплайн определяется как

$$\sigma(P) = \sum_1^n \lambda_i G_{2,2}(P - P_i) + v_{00} + v_{10}x + v_{01}y, \quad (5.13)$$

Где

$$G_{2,2}(P - P_i) = [(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2] \ln[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2] \quad (5.14),$$

здесь  $x, y$  – координаты точки  $P$ , а  $x_i, y_i$  – координаты точки  $P_i$ .

Отыскание коэффициентов сплайна сводится к решению следующей системы уравнений

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{\alpha} & G_{12} & \dots & G_{1n} & 1 & x_1 & y_1 \\ G_{21} & \frac{1}{\alpha} & \dots & G_{2n} & 1 & x_2 & y_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ G_{n1} & G_{n2} & \dots & \frac{1}{\alpha} & 1 & x_n & y_n \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 \\ x_1 & x_2 & \dots & x_n & 0 & 0 & 0 \\ y_1 & y_2 & \dots & y_n & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \dots \\ \lambda_n \\ v_{00} \\ v_{10} \\ v_{01} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \dots \\ r_n \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5.15)$$

При интерполирующем сплайне, решение задачи (5.10) - главная диагональ матрицы (5.15) содержит близкие к нулю значения, это накладывает ограничение на выбор способов ее обращения.

### 5.1.3 Связи кригинга и сплайнов

Кригинг аппроксимация и сплайны в многомерных областях похожи. Более того, как было показало Грэйс Вахба [Wahba, 1990] кригинг может представляться

как сплайн. Оливье Дюблор отмечал следующее сходство натуральных сплайнов и кригинга [Дюблор, 2002]:

1. использование радиальных базисных функций (значение ковариации в кригинге и функций Грина у сплайнов),
2. трендовая поверхность в универсальном кригинге аналогична ядру оператора сплайна.

Имеется и вычислительное сходство, для решения задачи приходится обращать плотную симметричную матрицу, и ее ранг больше числа точек, на которых заданы значения приближаемой величины. Это может создавать значительные вычислительные трудности. Пример вычислительных проблем кригинг аппроксимации привели приведены В.Н. Кутрунов и М. В. Дмитриевский [Крутков, Дмитриевский, 2001]. Они ссылаются на опыт австралийских математиков, которым для решения задачи с 4000 точками с исходными значениями на сетке 2000x2000 узлов, пришлось затратить 1750 минут вычислительного времени на высокопроизводительном компьютере CM5, имеющим 128 процессоров с 32 мегабайтами оперативной памяти каждый. Еще большие вычислительные проблемы возникают при попытке поточечного решения задачи кригингом с анализом положения исходных точек относительно сетки разломов. Такая возможность имеется в процедурах построения гридов программы Surfer компании Golden SoftWare от 6-ой версии и выше. Полученные автором соответствующие оценки и для таких задач показывают, что реальное время счета на персональных компьютерах средней производительности может исчисляться неделями.

Возвращаясь к непосредственному сравнению кригинга и сплайнов, отметим безусловные достоинства каждого из этих методов. Кригинг дает лучшую статистическую оценку картируемой переменной и обладает уникальной возможностью внутренней оценки качества построения модели. Математика сплайнов имеет ясную физическую природу. И кригинг и сплайны позволяют учитывать некоторые априорные соображения о характере моделируемого поля. Однако следует иметь в виду, что сплайн, в силу своей физической природы, практически всегда дает приемлемое приближение. Кригинг дает

удовлетворительное или очень хорошее приближение, только в том случае, если мы не ошиблись с подбором модели вариограммы. При «механическом» использовании кригинга можно получить сколь угодно плохие результаты приближения.

## **5.2 Применение кригинга и натуральных сплайнов при построении сейсмогеологических моделей**

Сейсмогеологическое моделирование требует решения двух важных проблем при использовании названных методов – огромное число исходных данных, которое делает технологически невозможным непосредственное решение системы линейных уравнений. Наличие разрывных нарушений, что также требует некоторой адаптации методов, построенных для гладких и непрерывных полей. При большом числе исходных данных (от десятков тысяч до нескольких миллионов) мы используем два способа, чтобы получить решение задачи в разумные временные сроки – прореживание сети исходных данных и использование двухкомпонентной модели приближаемого поля.

### **5.2.1 Подготовка данных для построения моделей геолого-геофизических поверхностей**

При построении сложных пространственных геолого-геофизических моделей обычно приходится использовать разнородные данные. Они могут отличаться точностью, способом получения, параметрами предварительной обработки, характером пространственного расположения (регулярные, не регулярные профильные и т.п.). Использование геолого-геофизических данных, полученных разными методами, и обладающих различной точностью, при построении согласованных моделей геологических объектов достаточно нетривиальная задача [Красавчиков, 2002]. В настоящем разделе, мы ограничимся лишь ситуациями, связанными с совместным использованием данных, имеющих разную случайную или систематическую погрешность.

Характерной задачей, для случая хаотически расположенных систем наблюдения, является построение структурных или параметрических карт по информации, полученной в скважинах разных категорий, например, в разведочных и эксплуатационных. Из-за меньшей точности в определении пространственного положения пластопересечений, данные наклонных скважин иногда полностью игнорируются при построении структурных моделей [Лапковский, 2007].

Однако ряд существующих методов пространственного моделирования позволяет учитывать результаты измерений разного качества при создании моделей геологических объектов или совместно учитывать различные, но связанные определенными зависимостями данные. Так, для кригинга эти задачи решаются с использованием аппарата ко-кригинга или совместного ко-кригинга. В методах сплайн-аппроксимации, реализованы возможности учета косвенных данных (например, углов падения слоев при построении структурных карт) [Василенко, 1980; Волков, 1980; 1988; Рожено, 2005]. Сплайны, построенные по интервально заданным данным, изучались П.-Ж. Лораном [Рожено, 2005]. Соответствующие решения в выпуклом множестве для одномерных и двумерных сплайнов получены А.В. Ковалковым [1983], М.И. Игнатовым и А.Б. Певным [1991]. Один из алгоритмов построения двумерного аналитического (выраженного через функции Грина) сплайна, заданного интервальными значениями (или комбинацией интервальных и строгих значений), создан автором в программном продукте **GridBuilder**. Этот алгоритм был использован для оценки допустимости и эффективности использования данных о пластопересечениях в стволах наклонных скважин совместно с данными, полученными в стволах вертикальных скважин [Лапковский, 2007].

Другая типичная ситуация, заслуживающая специального рассмотрения, возникает, когда совместно используются разные группы данных, имеющие систематические отклонения относительно друг друга. С подобными проблемами приходится сталкиваться при интерпретации результатов 2D сейсмических исследований, когда разные профили в точках пересечения показывают систематическое расхождение изучаемых параметров. Например, могут не

совпадать значения времени или амплитуд сигналов одних и тех же отражающих горизонтов на пересекающихся профилях. В этих случаях возникает **задача взаимной увязки** наблюдений.

Основными факторами, приводящими к возникновению систематических невязок на 2D группах геофизических профилей, в соответствии с анализом, проведенным А.Ф. Глебовым [2006], являются следующие технические и геологические факторы:

1. Независимый характер отработки и обработки отдельных профилей при котором могут использоваться разные технологии проведения полевых работ и параметры процедур обработки. Например, разная раскладка на регистрирующих косах сейсмических приемников в разных партиях, ведущих работы на одной площади, приводит к несовпадению полярности сейсмических записей этих партий.
2. Погрешности топографической привязки геофизических профилей. Данные разных лет съемок зачастую привязываются с использованием разных геодезических технологий. Различные обрабатывающие и интерпретационные системы позволяют независимо хранить собственно результаты геофизических измерений и их топографическую привязку. При этом, координаты профилей могут выражаться в различных несогласованных локальных системах. В некоторых случаях относительно точная привязка имеется только для концов профилей.
3. Наличие случайных помех и таких свойств изучаемого геофизического параметра, как зависимость от направления профиля, зависимость от базы измерения, неустойчивость измерений. Некорректный учет влияния верхней части разреза.

Обычно, проблема невязок системы пересекающихся профилей, решается площадным сглаживанием. Следствием подобной операции является то, что систематические погрешности, связанные с измерениями на отдельных профилях, в той или иной степени переносятся в пространственные модели геофизических

параметров. Задача избавления или минимизации подобных погрешностей является достаточно актуальной. Впервые, мы были вынуждены искать её решение, в связи с картированием геофизических параметров, заданных значениями своих производных по профилям [Канарейкин и др., 1984б; 1988]. Для её решения была предложена соответствующая математическая модель и создан алгоритм поиска аддитивной поправки, приводящей к минимизации суммы квадратов отклонений картируемого параметра в точках пересечения профилей [Муклыгин, Лапковский, 1985].

Более общая модель, в которой «мешающая» (профильная) составляющая измерения, представляется как полином  $K$ -той степени, и соответствующие алгоритмы отыскания поправок позже были разработаны А.Ф. Глебовым [1995; 2006].

Решение, полученное нами для ситуации, когда функция восстанавливается по значениям своих «косых» производных, и которое применимо для увязки систем профилей набором поправок константного сдвига, формируется следующим образом:

Пусть имеем  $N$  профилей, образующих связную группу, то есть, двигаясь только по ним, можно с  $i$ -того профиля попасть на  $j$ -тый профиль для любых  $1 \leq i, j \leq N$ . Пусть

$$F_i(S) = \int_0^S f_i(t) dt + C_i \quad (5.16),$$

Где  $S$  – расстояние от начальной точки профиля, выразит значение искомой величины (с учетом поправки) на заданном профиле.

Определить  $C_i$  для  $i=1, 2, \dots, N$  можно следующим образом. Введем обозначения

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i - \text{тый профиль пересекается с } j - \text{тым} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases},$$

$$f_{ij} = F_i - C_i \quad (5.17)$$





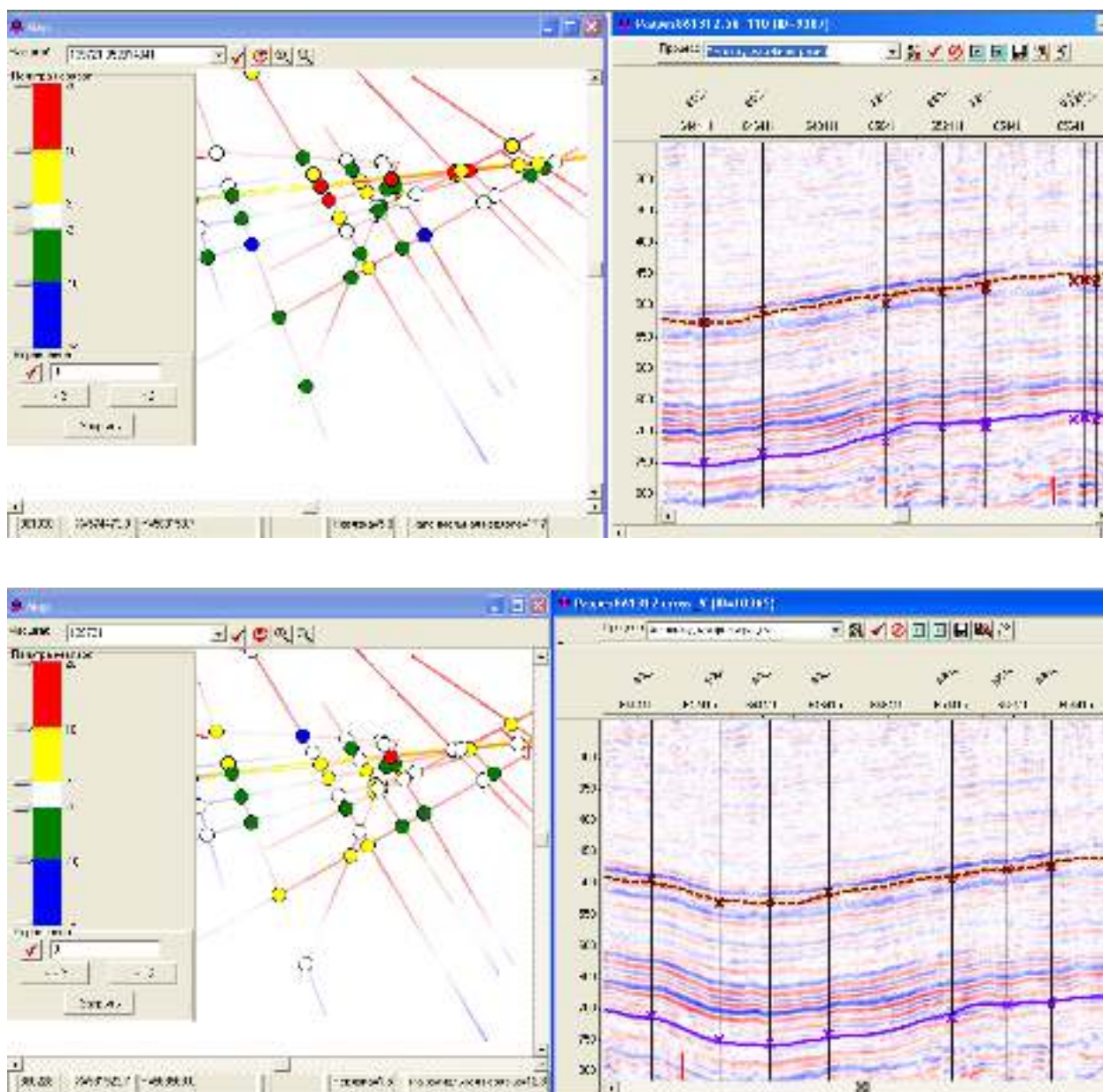


Рисунок 5.2 Результат работы процедуры увязки по крестам в программном комплексе W-seis.

Описанная выше процедура увязки эквивалентна сдвигу профильных данных на некоторую величину. Помимо операции сдвига, данные на пересекающихся профилях могут быть увязаны их масштабированием. Задача достаточно типична при построении моделей динамических параметров волновых полей, когда разные группы разрезов проекта, прошли обработку по разным графам или с разными параметрами. В данном случае и с учетом того, что функции заданы не производными, а своими значениями, несущими систематические ошибки, связанные с неодинаковым масштабированием, постановка задачи претерпевает следующие изменения:

Выражение (5.16) – (5.18) заменяются их аналогами

$$F_i(S) = f_i(S)C_i \quad (5.21),$$

$f_{ij} = F_i C_i^{-1}$  - значение  $F_i$  без учета масштабной константы  $C_i$  в точке пересечения с  $j$ -тым профилем, определено при  $\alpha_{ij} = 1$ .

Набор поправок  $C_i, i=1,2,\dots,N$  определяем из условия минимизации

$$\varphi = \sum_{i>j; i,j=1}^N (f_{ij}C_i - f_{ji}C_j)^2 \alpha_{ij}. \quad (5.22).$$

Система уравнений для частных производных записывается как

$$\frac{\partial \varphi}{\partial C_i} = \sum_{j=1, j \neq i}^N \alpha_{ij} f_{ij} (f_{ij}C_i - f_{ji}C_j) = 0, i = 1, 2, \dots, N \quad (5.23)$$

Также как и для (5.20), система совместна, имеет ранг  $N-1$  и одно неизвестное свободно, принимая одно из условий:  $C_i = const$  или  $\prod_{i=1}^N C_i = const$ , получаем невырожденную систему с положительно определенной матрицей, решение которой позволяет найти поправки масштабирования.

Еще один метод работы с исходными данными, который применяется в Weiss – это их редискретизация. Идея редискретизации, применительно к моделированию организованных по профилям данных сейсмических работ, была высказана в работе У.А. Смита и П. Уэссела [Smith, Wessel, 1990], целесообразность применения этого приема обосновывал А.В. Новокрещин [2005; 2006]. В основе метода лежит известная в теории из области обработки цифровых сигналов теорема Котельникова, сформулированная им в 1933 году в статье «О пропускной способности "эфира" и проволоки в электросвязи» как теорема П [Котельников, 2006; Гольденберг и др., 1985]. В англоязычной литературе – эта теорема известна как теорема Найквиста - Шеннона или теорема отсчетов. Данная теорема гласит, что, если аналоговый сигнал  $x(t)$  имеет финитный спектр, то он может быть восстановлен однозначно и без потерь по своим дискретным отсчетам, взятым с частотой, строго большей удвоенной верхней частоты  $f_c : f > 2f_c$ . Одним из следствий теоремы, является то, что высокие

частоты, которые содержатся в исходном сигнале, зарегистрированном при малом шаге дискретизации, переносятся на результат интерполяции, выполненной с большим шагом дискретизации с их зеркальным отражением относительно частоты Найквиста. По существу, это наложение высокочастотного шума на результаты интерполяции и, например, при построении сеточной модели с шагом 250 метров, использование всех данных, полученных на профилях, выполненных с шагом 25 метров, приводит к потере качества интерполяции. Реализованные автором технологии интерполяции таких излишне сгущенных данных, позволяют провести их прореживание либо путем вычисления средних значений для ячеек строящихся сеточных моделей, либо путем выбора медианных значений. При этом происходит учет положения исходных данных относительно линий разрывов, если такие имеются. Процедура прореживания является опционной и может быть отключена. Однако, поскольку она приводит к уменьшению объемов данных, без потери качества интерполяции, ее применение позволяет сэкономить вычислительные ресурсы.

При наличии разрывных нарушений, иногда возникают ситуации, когда данные искажены в зонах, прилегающих к разломам. Это характерно для результатов сейсмических работ. Другая, реально встречаемая ситуация – необходимость регридинга имеющихся бумажных вариантов структурных карт с предварительной оцифровкой изолиний и линий разломов, при небрежности в процессе оцифровки, могут возникать существенные ошибки аппроксимации из-за топологически неверного положения фрагментов изолиний относительно разломов. В этих случаях, может потребоваться удаление из всего массива тех данных, которые слишком близко находятся к разломам. Этот же способ фильтрации данных используется в технологии построения трехмерных структурных моделей в RMS Roxar [Emerson. Irap RMS, 2012].

### **5.3 Учет разрывных нарушений при построении и анализе двумерных моделей геологических поверхностей**

Геологические тела могут иметь разрывы, и это существенно осложняет применение большинства классических методов аппроксимации и

трансформации их числовых моделей. Данная проблема имеет уже солидную историю и некоторый набор средств ее решения. Большинство современных интегрированных пакетов, предназначенных для моделирования геологических бассейнов или отдельных границ, предлагают инструменты работы с разрывными поверхностями. При этом используются различные алгоритмы учета разрывов, которые в основном можно разделить на те, что связаны или с поблочной аппроксимацией поверхности и граничными условиями склейки на линиях разрывов, и те, в которых разрывы представляются как барьеры. Можно различать следующие ситуации:

1. Если известны амплитуды относительного перемещения блоков вдоль линий разрывов, то поверхность можно рассматривать как сумму дизъюнктивной и пликативной компоненты. Серьезным ограничением здесь является частое отсутствие достоверной информации о характере смещений по разломам. Такую информацию можно извлекать из анализа данных в участках пересечения сейсмических профилей и заданных линий разрывов.
2. Если структура разрывов позволяет разделить область построения модели на серию изолированных блоков. В каждом из блоков возможна аппроксимация поверхности непрерывной функцией. Серьезным препятствием в реализации данного подхода является наличие затухающих разломов. Для этого случая, в рамках аппроксимации геологических границ с помощью В-сплайнов А.М. Волковым [Волков, 1980; 1988] предложено использовать различные виды граничных условий на линиях разрывов. И формально выделено 4 вида разрывов (разрыв функции и первых производных, разрыв функции без разрыва производных, разрыв производных без разрыва функции, непрерывность функции и первых производных). Используя эти граничные условия всегда можно дополнить реальную структуру разрывов фиктивными, чтобы разбить карту на серию изолированных блоков. С точки зрения качества получаемых моделей это один из лучших алгоритмов, к тому же он оказался применим и для случаев с наклонными плоскостями смещения разрывов [Волков и др., 1985]. Для моделирования сложных объектов, содержащих десятки разрывов, процесс

задания фиктивных разломов и граничных условий на линиях всех разломов представляется несколько затруднительным.

3. Модель строится поточечно с анализом взаимного расположения исходных данных относительно линий разрывов. Разрывы в этом случае представляют собой барьеры, через которые не проникает влияние исходных точек. Этот алгоритм достаточно универсален в том плане, что разрывы могут совершенно произвольно располагаться в области построения модели и от интерпретатора не требуется дополнительных знаний об их природе. Однако он имеет существенные технологические ограничения – время построения модели линейно зависит от числа разрывов поверхности. Для реальных ситуаций, скажем построения моделей по сейсмическим данным, это означает минуты при наличии нескольких разломов и часы, или десятки часов для сотен разломов даже при вычислениях на весьма производительных компьютерах. Кроме этого, поверхность теряет целостность, выглядит мозаично, при этом невозможно представить ее морфологию в изначальном состоянии.

Автором предложен метод и его технологическая реализация, развивающая идею представления разломов как барьеров. В предлагаемом решении барьеры не являются абсолютно непроницаемыми. Они ослабляют взаимное влияние точек, расположенных по разные стороны от них, но не исключают его полностью. Этот процесс можно представить и как изменения способа формирования исходной матрицы, состоящей из значений функции Грина при реализации в сплайнах для пар исходных точек на плоскости, или значений вариограммы при реализации в кригинге. Суть метода, в искажении координат точек на плоскости рассекаемой линиями разломов. Близкие точки, но находящиеся по разные стороны разломов, как бы отталкиваются друг от друга (некий аналог спрединга моделируемой поверхности относительно разломов). Обозначим эту операцию как  $S$  (от *Spreading*, поскольку есть некоторая аналогия с геологическим спредингом). Данная операция определяется положением разрывов поверхности. Для  $S$  существует обратная операция  $S^{-1}$ , которая пространство, искаженное операцией  $S$  преобразует к его изначальному состоянию. Суть метода построения аппроксимации разрывной поверхности следующая – область  $\Omega$  с дискретно

заданными значениями разрывной поверхности преобразуется с помощью  $S$ , при этом получает другую область  $\Omega_S=S(\Omega)$ , в которой поверхность аппроксимируется непрерывной функцией (сплайном или кригингом). Полученный результат затем, с помощью  $S^{-1}$  восстанавливается для исходной области.

Продемонстрируем, как это работает на простом тестовом примере.

Этот метод позволяет строить карты содержащие сотни и тысячи фрагментов разрывов на сетках большого размера (до нескольких тысяч строк и столбцов), как при незначительном числе исходных данных (например, данные бурения), так и при огромном числе данных (данные сейсморазведки порядка сотен тысяч исходных значений). При этом, время создания и преобразования сложных моделей, не превышает 1-2 минут на компьютерах со средней производительностью. Поясним теперь, как этот аппарат был адаптирован для ситуации, когда поверхность осложнена разрывами. Для области построения карты создается двумерная функция, определяемая положением разрывов, значения которой вносят поправки в координаты исходных точек.

На рисунке 5.3 показаны в виде двумерных полей значения новых координат  $x$  и  $y$ , получаемых в результате преобразования области построения карты. Линии черных точек – положение точек исходных данных до преобразования, а синие точки – они же после преобразования. Цветом и положением изолиний на рисунке 5.3 показана деформация пространства области построения карты оператором  $S$ .

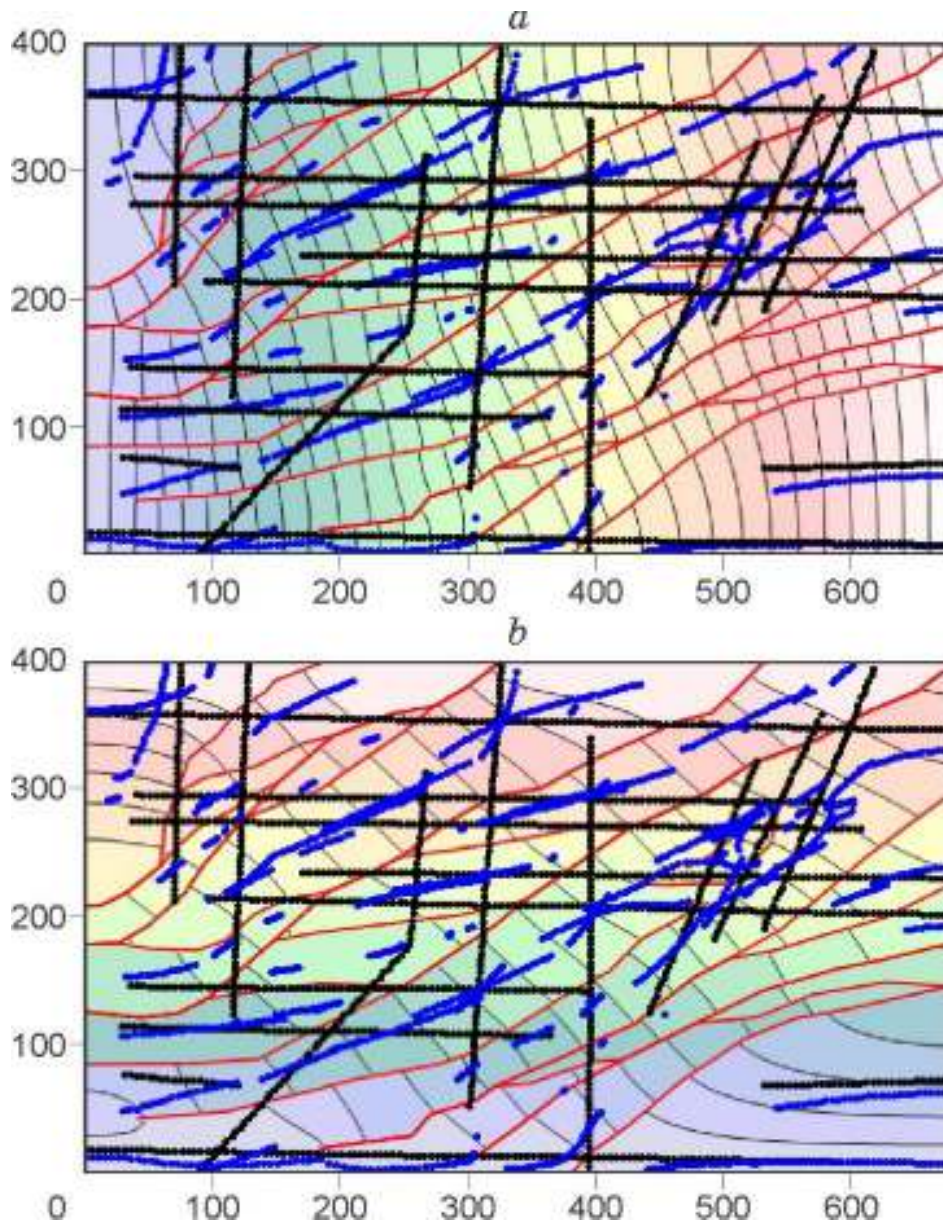


Рисунок 5.3 Результат преобразования  $S$ .  $a$  – преобразование для координаты  $x$ ,  $b$  – преобразование для координаты  $y$ .

### 5.3.1 Двухкомпонентные модели приближаемого поля

И аппроксимация натуральными сплайнами, и кригинг, позволяют непосредственно восстанавливать двумерные поля, заданные не более чем несколькими тысячами точками измерения. Это технологическое ограничение. В таких ситуациях продуктивно рассматривать восстанавливаемое поле как сумму трендовой компоненты и наложенной на тренд высокочастотной компоненты.



$$f(\Omega) = \sigma(\Omega) + \varphi(\Omega) \quad (5.24),$$

Здесь  $f(\Omega)$  – модель восстанавливаемого поля,  $\sigma(\Omega)$  – трендовая компонента поля,  $\varphi(\Omega)$  – его локальная высокочастотная компонента. Технология вычислений проста, трендовая компонента — это сплайн или кригинг, которая находится по выборочной совокупности данных, удовлетворяющей технологическим ограничениям, то есть максимум – первые тысячи точек. Сплайн может быть интерполирующим (5.12) или сглаживающим (5.14). Кригинг, также может быть разного вида и с разными типами вариограмм. Построенная таким образом поверхность рассматривается как начальное приближение моделируемого поля. Основываясь на довольно большом числе исходных точек, эта приближение восстанавливает его основные значимые особенности. Далее, для всей совокупности исходных данных вычисляются значения

$$\varphi = \{\varphi_i = z_i - \sigma(P_i), i = 1, 2, \dots, n\} \quad (5.25).$$

Используя полученные отклонения исходной совокупности данных от трендовой поверхности, строится модель локальной компоненты поля. Для чего используются простые, но быстрые методы аппроксимации. В качестве таких методов аппроксимации, мы используем два – осреднение в скользящем окне со встроенной весовой функцией и разностный метод.

Метод скользящего среднего взвешивания для построения моделей геологических полей применяется достаточно давно, но и в настоящее время он не утратил своего значения и входит в состав таких востребованных в геологии программных продуктов, как Surfer Golden Software, Petrel Schlumberger и RMS Roxar. В работах автора этот метод используется для построения числовых моделей структурных поверхностей и при оценке их дифференциально-геометрических характеристик [Лапковский, 1983; 1984]. В качестве весовой функции в скользящем окне, может использоваться функция Гаусса. Соответственно, поле в каждой точке сеточной модели оценивалось как средневзвешенное от всех известных значений, находящихся в ближайшей окрестности

$$\hat{z} = \frac{\sum_{i=1}^n z_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}, \quad (5.26)$$

Здесь  $W_i = e^{\frac{-R_i^2}{2s^2}}$  - значение веса для  $i$ -той точки, попавшей в скользящее окно,  $R_i$  – расстояние между центром окна и  $i$ -той точкой,  $s$  – параметр определяющий форму экспоненциальной функции. Для моделирования анизотропных полей результат вычисления расстояния и соответственно весов в формуле (5.26) зависит от направления и степени анизотропии, которые могут изменяться в области моделирования [Лапковский, 1984].

Другой метод быстрой аппроксимации локальных компонентов поля – реализованная разностная схема решения стационарной задачи с уравнением Лапласа [Самарский, 1968]. В качестве начального приближения поля, которое присваивается всем узлам грида, используется величина  $E(\varphi)$ , напомним, что  $\varphi$  - множество отклонений известных значений поля  $z_i$  от его трендовой компоненты (5.23). После этого, для каждой точки  $P_i$  определяется ближайший узел грида, куда переносится значение  $\varphi_i$ , эти узлы не изменяют своих значений по ходу работы разностного метода. То есть, эти узлы определяют краевые условия. Итерационное переопределение значений в тех узлах грида, где они могут меняться, путем вычисления среднего по соседним узлам, приводит к стационарному решению удовлетворяющему уравнению Лапласа.

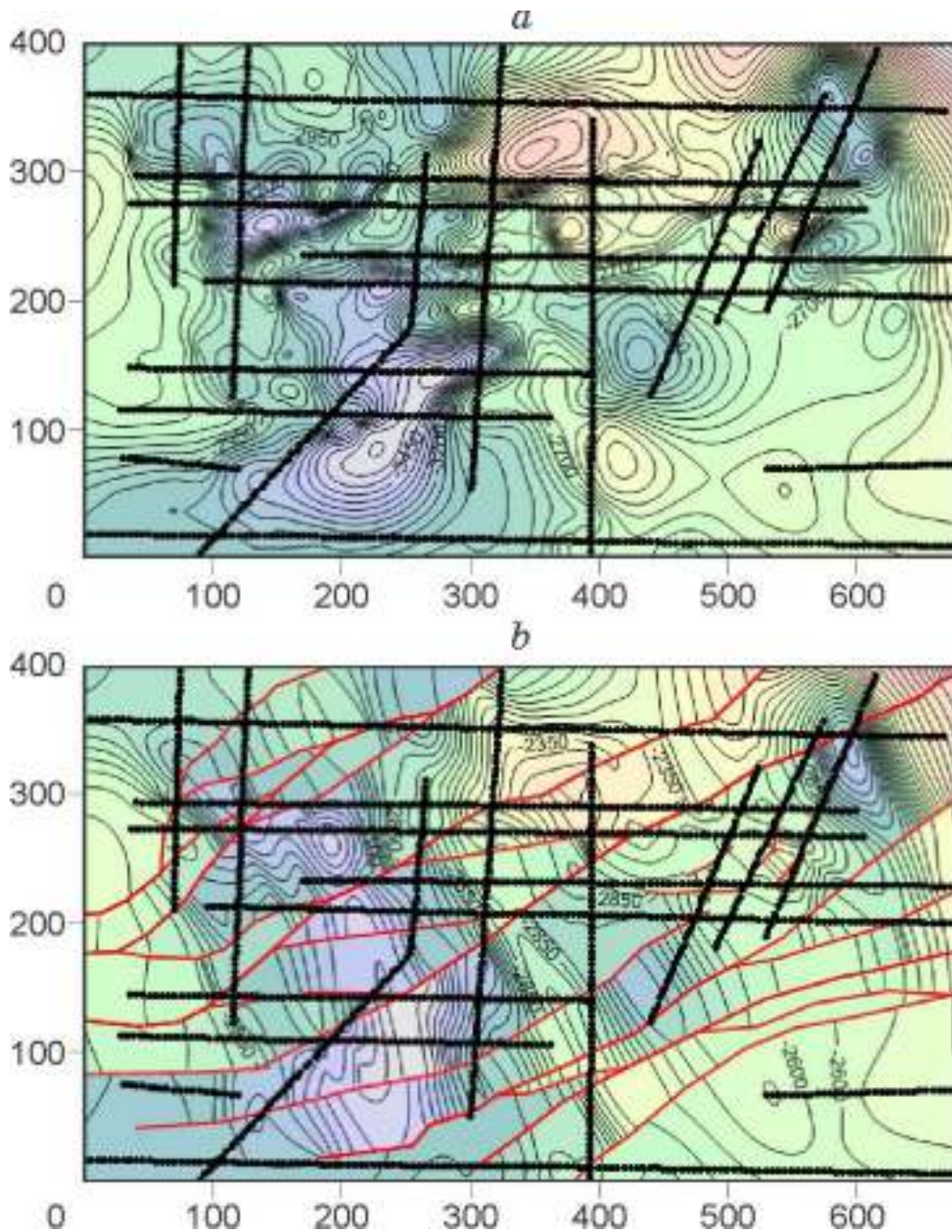


Рисунок 5.4 Построение модели поверхности с разломами. а – гладкая карта в пространстве  $S(\Omega)$ , б – та же карта, после выполнения преобразования  $S^{-1}$  и перехода в пространство  $\Omega$ .

Результат построения модели поверхности для данного примера представленного на рисунке 5.3 показан на рисунке 5.4. На рисунке 5.4а приведена гладкая карта, построенная методом сплайн-аппроксимации в пространстве, искаженном преобразованием  $S$ .

Увеличенный фрагмент карты 5.4b показывает, что модель поверхности построенная с разрывами, строго соответствует исходным данным – рисунок 5.5.

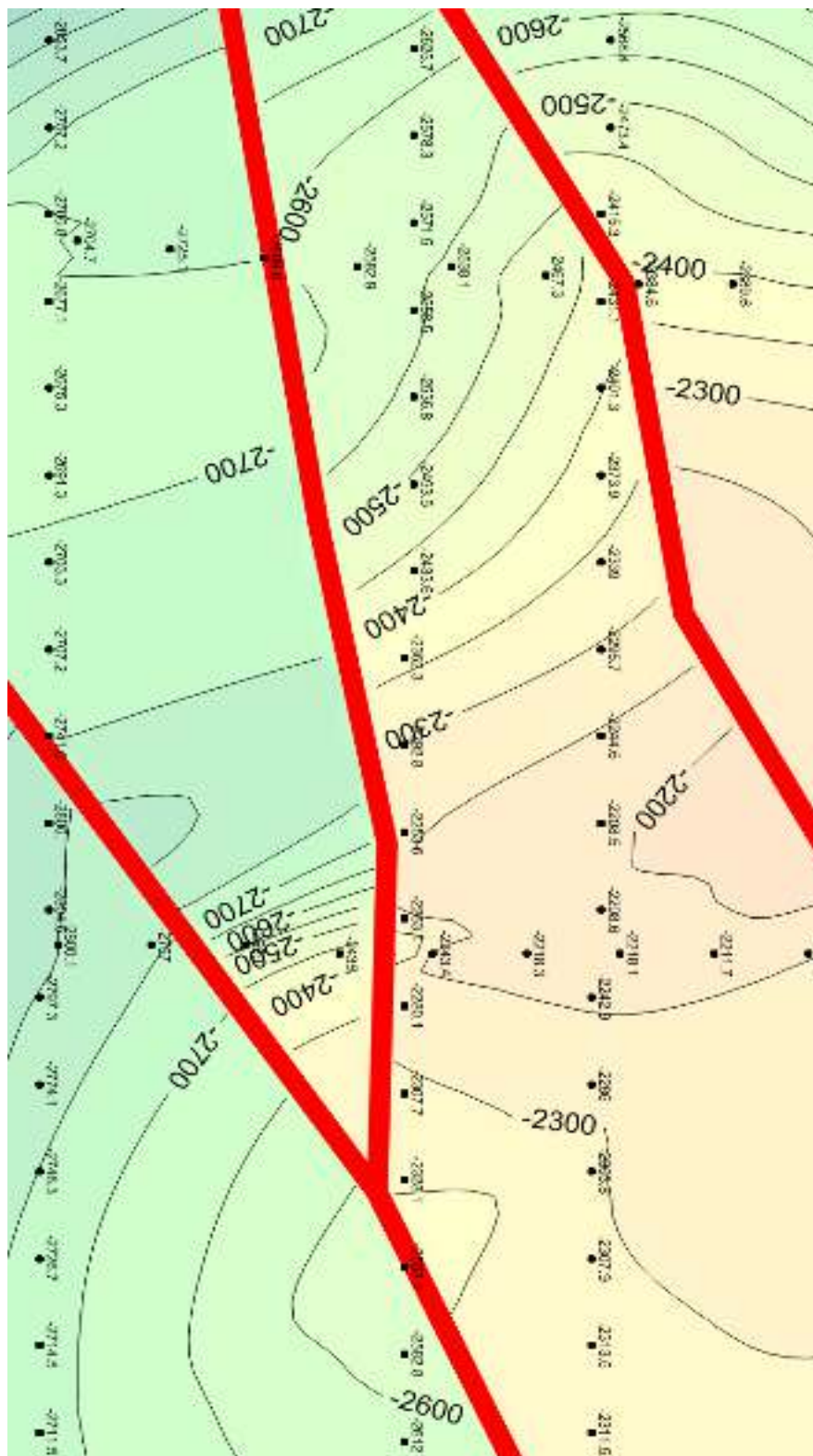


Рисунок 5.5 Увеличенный фрагмент карты Рисунок 5.4b.

Представленные карты демонстрируют следующие выигрышные стороны примененного алгоритма аппроксимации:

1. Хотя поверхность и разбита амплитудными разрывами, она выглядит целостной – резких изменений направлений изолиний на границах разрывов не происходит.
2. Даже в ситуации недостатка или полного отсутствия исходных данных в блоке (правый нижний фрагмент любой из карт на рисунке 5.5b), удастся построить модель, которая неплохо согласуется с соседними участками карты. Это достигается за счет определенной «прозрачности» разломов.
3. Структура поверхности не связана со структурой исходных данных, в том плане, что нет явных особенностей карты повторяющих направления профилей или их пересечения.
4. Данный подход оказался вполне технологичным. При количестве исходных данных порядка 1400, в общем числе линейных отрезков на линиях всех разрывов порядка 300 вычисление примера, показанного на рисунках 5.4, на компьютере со средней производительностью не превышает 1 минуты.

Рисунок 5.6 показывает результат моделирования реального объекта в связи с задачами оценки его нефтеносности, выполненный специалистами ЗАО «Пангея» [Лурье и др., 2004, Рисунок 6]. При этом были использованы методы работы с разломами, разработанные автором. Данный пример интересен тем, что

здесь для сложнопостроенного объекта создана модель с десятками реальных разрывных нарушений.

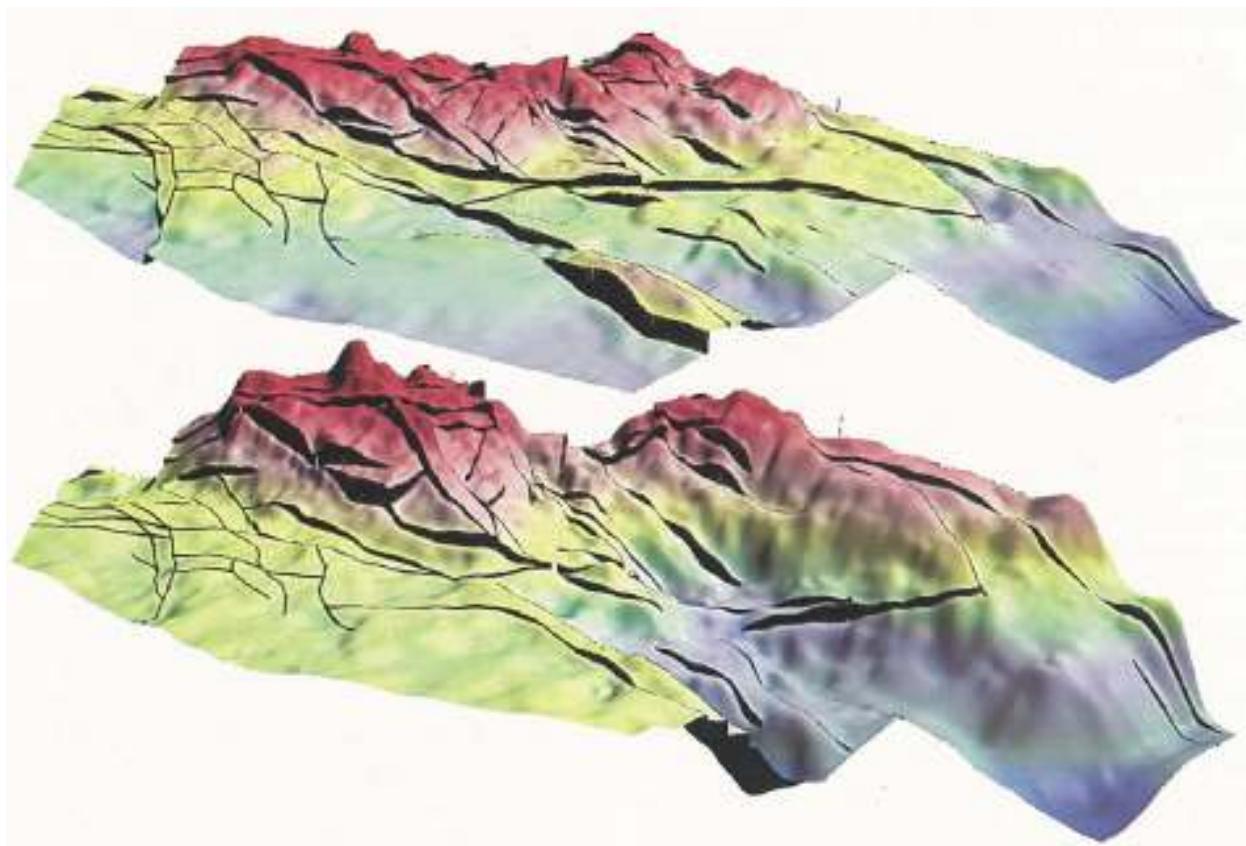


Рисунок 5.6 Пример модели сложнопостроенного месторождения из работы [Лурье и др., 2004; рисунок 6]. Модель создана на основе методов аппроксимации поверхностей с разрывами, разработанных автором диссертационной работы.

#### **5.4 Реализация технологии аппроксимации поверхностей с заданными глобальными ограничениями**

Очень часто необходимо учесть некоторые ограничения общего характера при построении моделей геологических объектов, так коэффициенты пористости или нефтенасыщенности не могут быть отрицательными. Также не могут быть отрицательными коэффициенты песчанистости тех или иных пачек, а это значит, что толщина эффективной части коллектора должна лежать в пределах от 0 до значения толщины всей пачки.

При необходимости данная задача решается после построения числовой модели параметра, на значения которой наложены ограничения типа максимально

допустимых значений. Реализовать этот процесс можно с помощью грид-калькулятора в модуле *GridMaster*.

Другую возможность предоставляет программный модуль GridBuilder и RegressGridding на этапе построения числовых моделей параметров. При заданных ограничениях, значения на результирующей сеточной модели преобразуются следующим образом:

$$\hat{Z} = \varepsilon(Z),$$

Здесь  $Z$  – значения, полученные в результате аппроксимации,

$\hat{Z}$  – измененные значения, учитывающие установленные ограничения,

которые вычисляются следующим образом:

$$\varepsilon(Z) = \begin{cases} Z = Z_0 - \text{comp}(-Z_0, -Z_{min}, -Z), & \text{если } Z < Z_0, \\ Z, & \text{если } Z_0 \leq Z \leq Z_1, \\ Z = Z_1 + \text{comp}(Z_1, Z_{max}, Z), & \text{если } Z > Z_1. \end{cases} \quad (5.27)$$

Здесь  $[Z_0, Z_1]$  – интервал значений, не подлежащих изменению,  $[Z_{min}, Z_{max}]$  – интервал допустимых значений (предполагается, что результат аппроксимации может из него выходить). Функция внесения поправки в исходных значениях *comp* (название от compression) определяется следующим образом:

$$\text{comp}(Z_1, Z_{max}, Z) = Z_1 + r \left\{ \frac{4}{1 + \exp(r^{-1}(Z - Z_1))} - 2 \right\}$$

где  $r = (Z_{max} - Z_1)/2$

Рисунок 5.7 иллюстрирует работу функции (5.27).

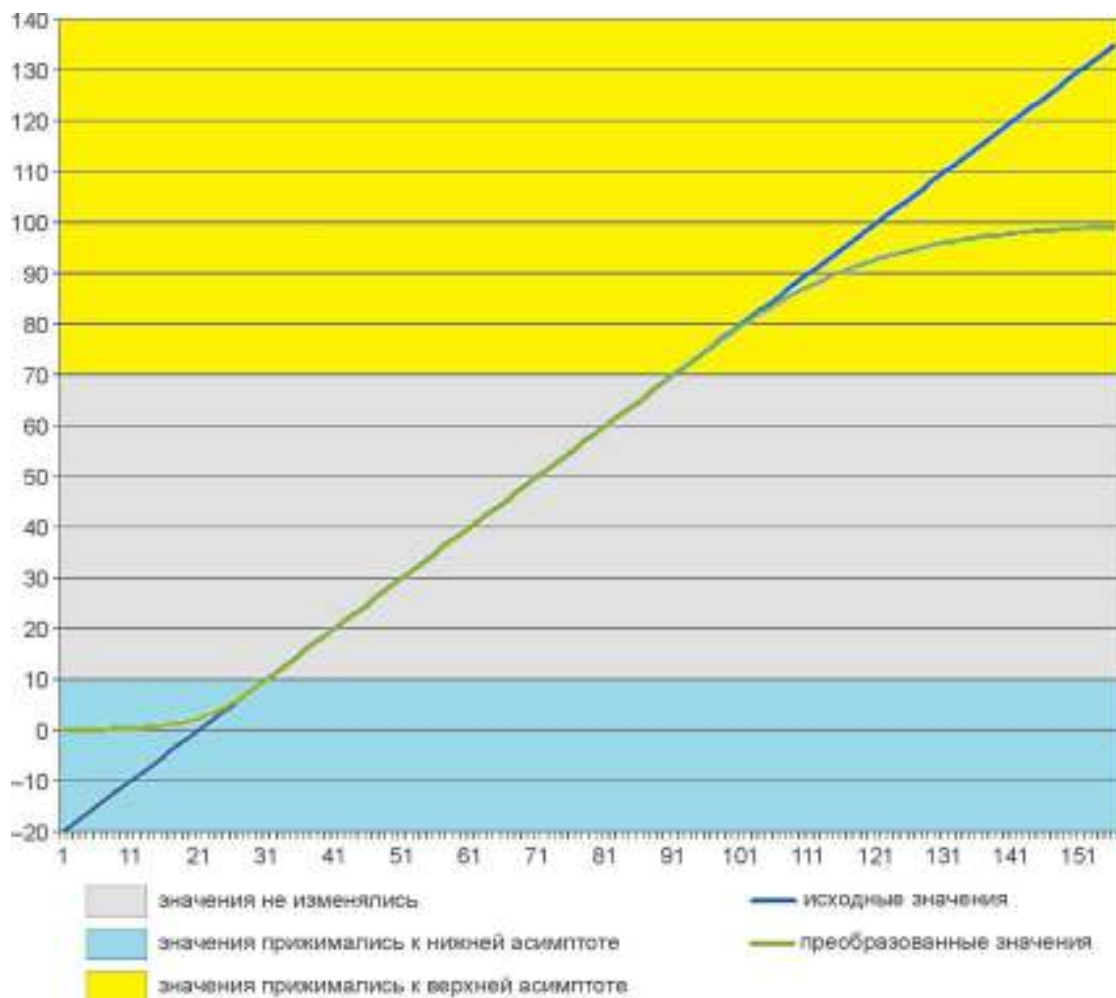


Рисунок 5.7 Иллюстрация работы функции преобразования значений аппроксимации в заданный допустимый интервал.

В приведенном на рисунке 5.7 примере показано два графика – синим цветом график некоторой исходной величины, которая (например, в результате аппроксимации) местами оказалась вне диапазона допустимых значений, а зеленым цветом показан график её преобразованных значений, с учетом заданного допустимого интервала. В данном примере область неизменяемых значений находится в диапазоне от 10 до 70 (при построении реальных моделей, как правило область неизменяемых значений совпадает с диапазоном, в котором лежат исходные данные), а область допустимых значений – от 0 до 100.

### 5.5 Построение карт с учетом регрессионных зависимостей

Структурное картирование нефтегазоносных отложений, по-видимому впервые, было использовано специалистами геологической службы Соединенных



Штатов У.Т. Грисвудом и М.Дж. Манном [Griswold, 1903; Griswold, Munn, 1907; Калицкий, 1916; 1933]. Ими были составлены первые структурные карты для нефтеносных районов Пенсильвании, Огайо и Западной Вирджинии. За сравнительно короткий период в первой декаде двадцатого века были зарисованы обширные территории, причем карты издавались систематически и по листам. Результаты и методы структурной съемки У.Т. Грисвуда и М.Дж. Манна описаны в их статьях и опубликованы в бюллетене геологической службы Соединенных Штатов. Метод картирования целевых горизонтов, предложенный этими геологами, получил в дальнейшем название «метод схождения» и вошел в практику структурных исследований как один из важных приемов прогноза глубокозалегающих границ на основе относительно хорошо изученных вышележащих [Михайлов, 1984].

Одна из особенностей метода схождения – подобие целевого и опорного (опорных) горизонтов. Это подобие существует в пределах единого структурного этажа в осадочных толщах. Оно возникает из-за относительно слабой изменчивости мощностей слоев, по сравнению с изменчивостью уровня их гипсометрического положения.

Метод схождения используется при построении карт по редким скважинным данным на основе имеющихся качественных структурных моделей. Для его реализации достаточно наличие качественных процедур аппроксимации и математических операций над гридами и данными по нерегулярным сеткам. В частности, *GridMaster* позволяет проводить построения карт методом схождения. В программных продуктах мировых лидеров по производству инструментов трехмерного моделирования геологических объектов, метод схождения реализован компанией *GeoGraphics* в виде модулей *smartSECTION* и *Discovery FrameBuilder*. Эти продукты позволяют строить согласованные структурные карты по данным каротажа с одновременным учетом положения пластопересечения нескольких геологических границ. Реализованный метод получил название - *conformance mapping* [Tearpock, Bischke, 2002].

Другая возможность учитывать ранее полученные структурные модели при создании карт по прямым, но редким системам наблюдения - использовать математические модели связи структурных поверхностей разного возраста.

Модель Т.Б. Хэйтса [Haites, 1963], сведения о которой приведены во второй главе, открывает такую возможность на основе проективных (линейных) отображений. С.В. Гольдиным было предложено, обобщить модель Т.Б. Хэйтса для задач данного рода на основе линейных соотношений мощностей слоев [Гольдин, 1971]. Задачи подобного рода в рамках продукта *W-seis* решаются с помощью ассоциированного модуля *RegressGridding*.

В некоторой двумерной области  $P$  имеем пространственную переменную  $Z(P)$ , заданную своими значениями в конечном числе точек,  $P_1, P_2, \dots, P_n$ . В области  $P$ , также заданы одна или две функции –  $T, B$ , для которых предполагается существование статистически значимой зависимости с переменной  $Z(P)$ . Оценка и использование этой зависимости позволяет по малому числу исходных данных качественно оценить искомую функцию в области  $P$ . Например,  $T$  и  $B$  могут быть предварительно построенные карты глубины залегания кровли и подошвы пласта (обозначения  $T$  и  $B$  от *top* и *bottom*) для некоторого пласта, а  $Z$  – функция изменения пористости этого пласта. Ограничение на то, что вспомогательных функций не более двух – особенность реализации.

Модуль *RegressGridding* допускает оценку функции  $Z(P)$ , путем построения уравнения линейной регрессии от одной из следующих моделей, с перечисленным ниже набором независимых переменных:

1.  $(T)$ ,
2.  $(T, B)$ ,
3.  $(T^2, T)$ ,
4.  $(T^2, T, B^2, B, TB)$ ,
5.  $(T^3, T^2, T)$ ,
6.  $(T^3, T^2, T, B^3, B^2, B, T^2B, TB^2, TB)$ .

По заданным исходным данным, вычисляются коэффициенты уравнения линейной регрессии для выбранной модели. Значения картируемой переменной вычисляется во всех углах грида, покрывающего область  $P$ .

После этого возможно последовательное применение одного или двух шагов коррекции полученного результата. *Первый шаг* – обеспечивает строгое соответствие получаемой модели заданным исходным данным (уравнение

регрессии не обеспечивает данное соответствие, за исключением частных случаев). Этот шаг заключается в построении и учете карты отклонений регрессионной модели от имеющихся наблюдений. При его реализации используются процедуры сплайн или кригинг аппроксимации. *Второй шаг* – учет возможных ограничений, типа тех что рассмотрены в разделе 5.4.

### 5.5.1 Пример использования модуля **RegressGridding**

Данный пример демонстрирует основные возможности, предоставляемые модулем **RegressGridding** в задачах построения пространственных моделей геологических параметров, когда картируемая переменная может быть оценена через уравнения регрессии с имеющимися числовыми моделями одной или некоторых независимых переменных. Объектом моделирования является слой коры выветривания, развитый на палеозойских отложениях в пределах Останинской и Северо-Останинской площади Томской области Западной Сибири. Сейсмогеологическая модель для данных отложений была создана К.И. Канаковой и И.А. Губиным [2011]. При интерпретации сейсмических данных эти авторы пользовались интерпретационными возможностями пакета сейсмогеологического моделирования *W-seis* [Конторович, Лапковский, 2008]. А для оценки площадного распространения коры выветривания и ее толщины, ими были построены многомерные уравнения регрессии, связывающие толщину коры выветривания с сейсмическими атрибутами. Соответствующая работа выполнялась в MS Excel и *Surfer GoldenSoftware*. Карта толщины коры выветривания, построенная в работе [Канакова, Губин, 2011], приведена на рисунке 5.8.

Прогнозная карта толщины коры выветривания  
на палеозойских отложениях. Останинская и Северо-Останинская площадь  
(по материалам К.И.Канаковой и И.А.Губина)

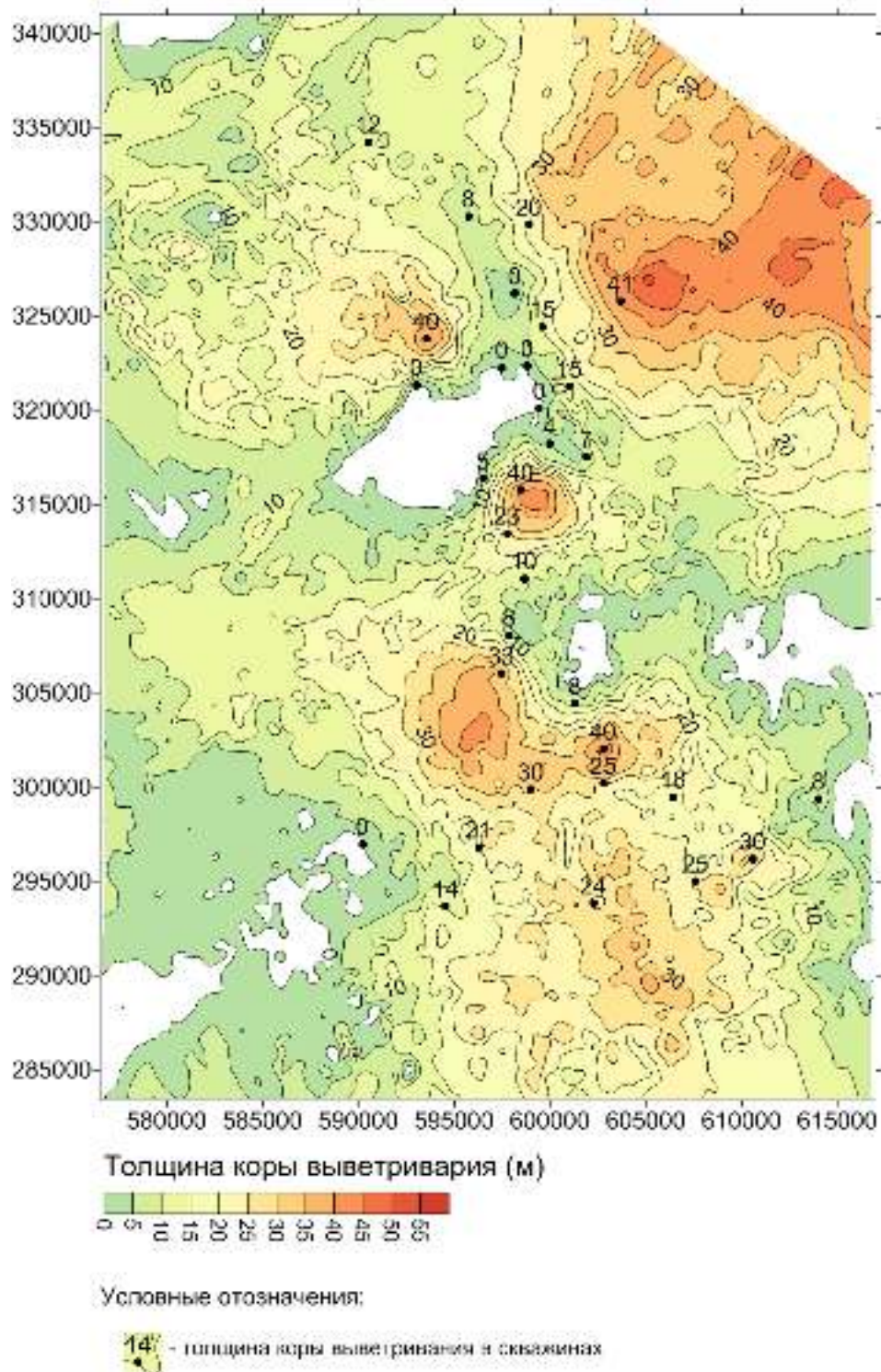


Рисунок 5.8 Карта толщин коры выветривания палеозойских отложений (результат «полуручного» построения, выполненного К.И. Канаковой и И.А. Губиным).

При вычислении данной карты были использованы линейные и нелинейные зависимости прогнозируемого параметра, заданного в скважинах Останинской и Северо-Останинской площади и значений следующих переменных, оцененных по сейсмическим данным:

- $t_0$  отражения от кровли палеозойских образований,
- энергия сейсмической записи на уровне кровли палеозойских образований,
- промежуток двойного времени пробега сейсмической волны от горизонта Па (кровля баженовской свиты) до кровли палеозойских отложений.

На рисунке 5.9 представлены результаты вычисления толщины коры выветривания, полученные по тем же исходным данным, но в рамках работы программы RegressGridding. При этом, в автоматическом режиме строились регрессионные зависимости и результирующие карты корректировались так, чтобы удалить несоответствие в скважинах рассчитанных и измеренных значений толщины коры выветривания.

Обе представленные карты прогноза толщины коры выветривания на основе использования регрессионных зависимостей этого параметра с атрибутами сейсмических записей оказались достаточно близкими, но не одинаковыми. Различия имеют не существенный характер, а их появление связано, во-первых, с тем, что подбор зависимости в RegressGridding проходит не более чем по двум переменным (то есть используется другая модель). Кроме того, отличались и способы увязки промежуточных расчетов и скважинных данных.

### Прогнозная карта толщины коры выветривания

на палеозойских отложениях. Останинская и Северо-Останинская площадь  
(по материалам К.И.Канаковой и И.А.Губина)

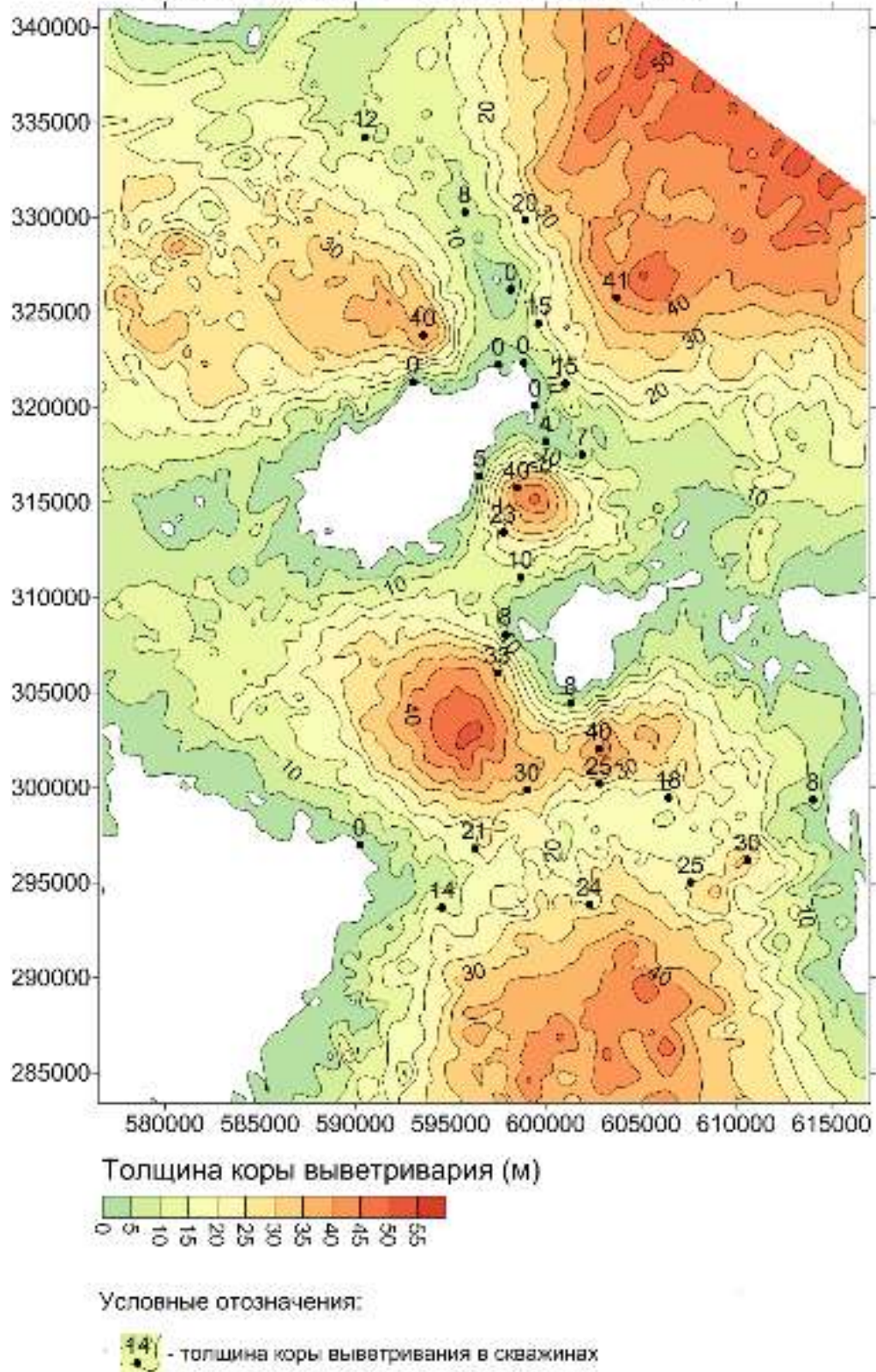


Рисунок 5.9 Карта толщин коры выветривания палеозойских отложений (результат работы программы RegressGridding).

## 5.6 Построение трехмерных моделей геологических объектов

Построение 3D статических или эволюционных моделей является уже почти рутинной практикой при оценке резервуаров в нефтяной геологии [Жаксыбеков и др., 2005; Глебов 2006; Билибин, 2009; Закревский 2009]. Поскольку автор на протяжении многих лет был вовлечен в решение задач трехмерного моделирования сложных геологических объектов, есть необходимость высказать соображения по актуальным вопросам этой области и представить собственные результаты (далеко не всеохватывающие) на фоне тех успехов, которые усилиями многих специалистов здесь получены за последние три десятка лет.

Под  $n$ -мерной моделью мы понимаем отображение  $\varphi$   $n$ -мерной области евклидова пространства  $E^n$ , которую занимает моделируемый геологический объект, на некоторую шкалу или знаковую систему  $Y$ :

$$\varphi: E^n \rightarrow Y$$

В этом смысле обычная структурная карта или соответствующий ей грид является двумерной моделью, в которой ограниченная плоская область пространства отображается на вещественную шкалу высот, глубин или времен. При этом, имеется особенность - шкала, на которую дается отображение является третьей переменной пространства, для которого строится это отображение. Структурную карту для некоторой стратиграфической поверхности можно понимать и как

$$\varphi_r: E^2 \rightarrow E,$$

и как

$$\varphi_b: E^3 \rightarrow B.$$

В первом случае двумерная область отображается на вещественную шкалу глубин, а во втором структурная поверхность интерпретируется как граница, разделяющая трехмерную область пространства на две стратиграфически разные подобласти, точки которых находятся выше и ниже данной границы. В данном случае шкала обозначена символом  $B$  (*Boolean*).

Если построить обычные структурные карты для  $k$  геологических границ, то все двумерные grids можно свести к одной трехмерной модели, в которой точки пространства отображаются на порядковую шкалу стратиграфических отношений.

Исторически, именно подобные модели строились для трехмерной характеристики многослойных геологических объектов. Они продолжают создаваться, и в настоящее время на этапе разведки и подсчета начальных балансовых запасов залежей и целых нефтегазоносных комплексов [Лапковский, Мельников, 1988; Кашик и др., 2003; Ершов и др., 2009].

Более детальные и сложные модели получают путем разбиения слоев на отдельные прослой с параллельным переносом их кровли, подошвы или благодаря их линейному пропорциональному суммированию. Именно эта технология, является основной при создании сложных трехмерных моделей многослойных объектов в таких системах как *Petrel Schlumberger*, или *RMS Roxar*.

Основная проблема, которая при этом сохраняется, связана с принципиальной сложностью однозначного двумерного отображения определенного вида геологических границ на шкалу глубин. Прежде всего, это относится к областям зон надвигов и опрокинутых складок. Как было показано [Лапковский, Сребный, 1986], использование проективных отображений позволяет применять методы аппроксимации однозначных двумерных функций к некоторым видам опрокинутых складок. Пример, демонстрирующий принципиальную возможность построения моделей опрокинутых складок с использованием проективных преобразований показан на Рисунке 5.10.



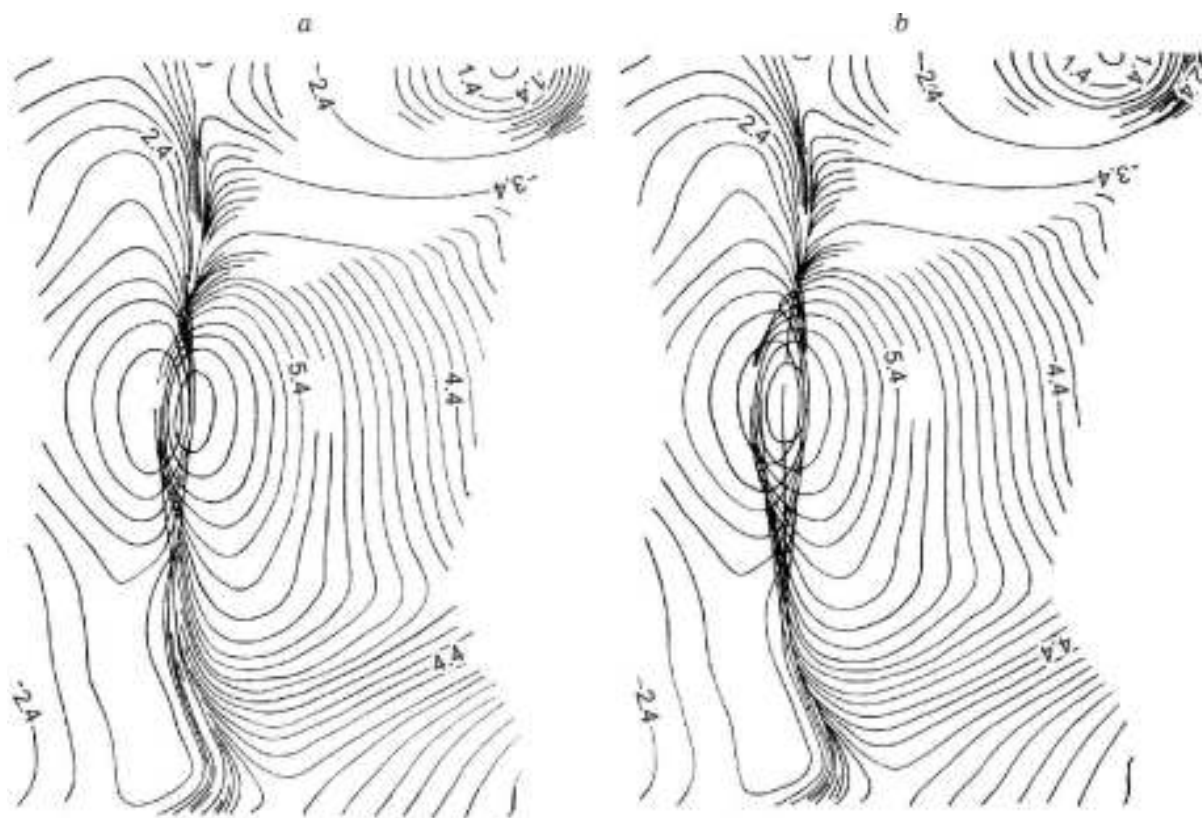


Рисунок 5.10 Стереопара карты изолиний опрокинутой складки, полученная с использованием проективных преобразований. а – левая часть стереопары, b – правая часть стереопары.

Значительный прогресс в последние двадцать лет был обеспечен использованием сеток непрямоугольной, иногда сложной геометрии при построении моделей распределения свойств, а также в гидродинамических симуляторах для сложных в тектоническом или фациальном отношении резервуаров. Приведем краткий обзор современных решений, применяемых при построении трехмерных сеточных моделей в геологии.

Плоские сетки, состоящие из примыкающих треугольников. Эта разновидность гридов применялась при моделировании геологических границ еще с начала 70-х годов прошлого века [Crain, 1970]. Треугольные гриды позволяют воспроизводить достаточно сложные поверхности, поэтому они применяются при моделировании форм разорванных границ, слоев в опрокинутых залеганиях и диапиров. Процедуры генерация геометрических моделей сложных поверхностей, заданных своими плоскими срезами (горизонтальными или вертикальными), реализованы автором в виде библиотеки функций и набора тестов. На Рисунке 5.11 показана поверхность в четырех разных

проекциях, различные стороны которой окрашены синим и золотистым цветом. Данный рисунок служит примером работы методов библиотеки 3D моделирования.

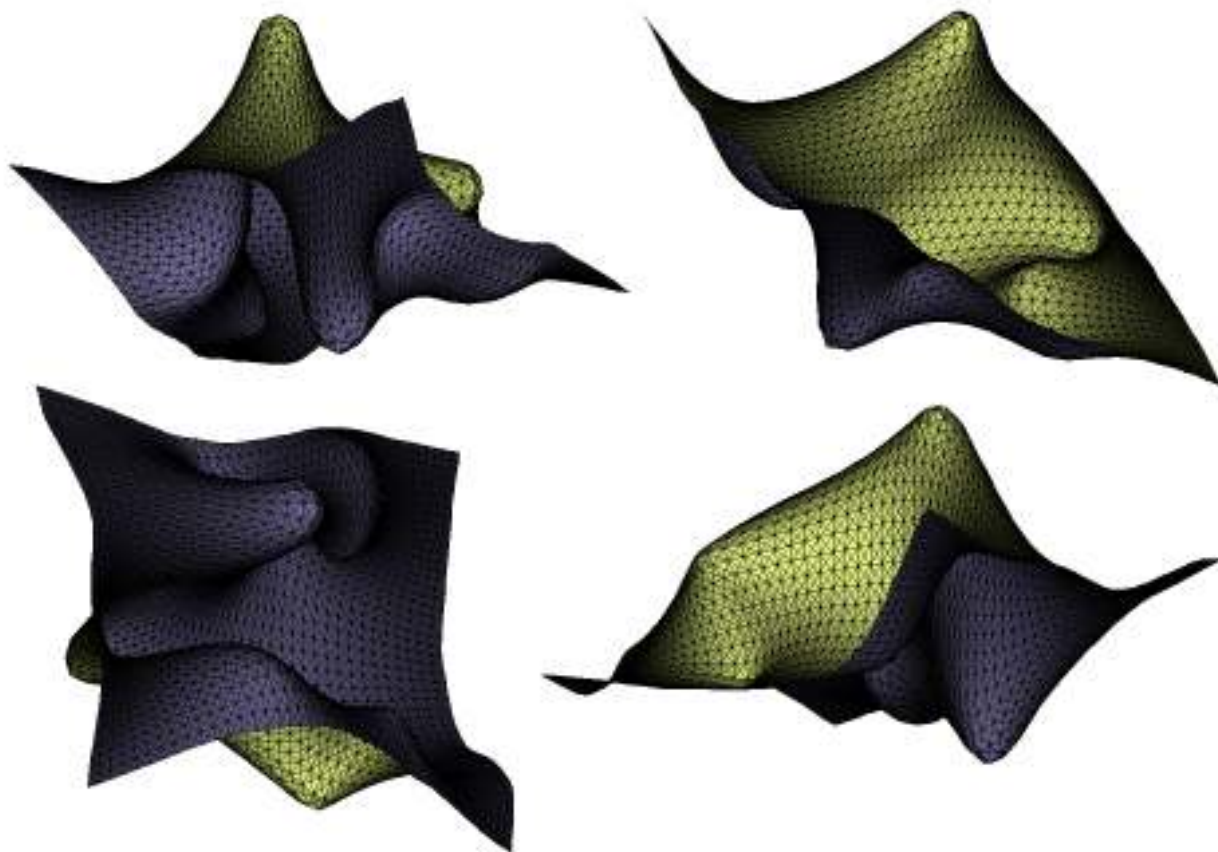


Рисунок 5.11 Поверхность сложной формы в разных проекциях, созданная по исходно заданным четырем плоским сечениям (кривым).

Для работы с трехмерным распределением геологических свойств, в том числе стратиграфической характеристики тел, использованы методы многомерной сплайн-аппроксимации и кригинга. С вычислением значений соответствующих параметров в узлах 3-х мерных регулярных прямоугольных сеток. Реализованные процедуры являются трехмерными аналогами тех методов, которые описаны выше в данной главе для двумерных случаев. Они пока не нашли широкого практического использования, но тем не менее я счел возможным представить модельный пример вертикального сечения сложного геологического объекта – Рисунок 5.12. Данный пример, демонстрирует возможности построения моделей на 3D сетках с двумя поверхностями несогласия и разрывными нарушениями разной возрастной генерации.

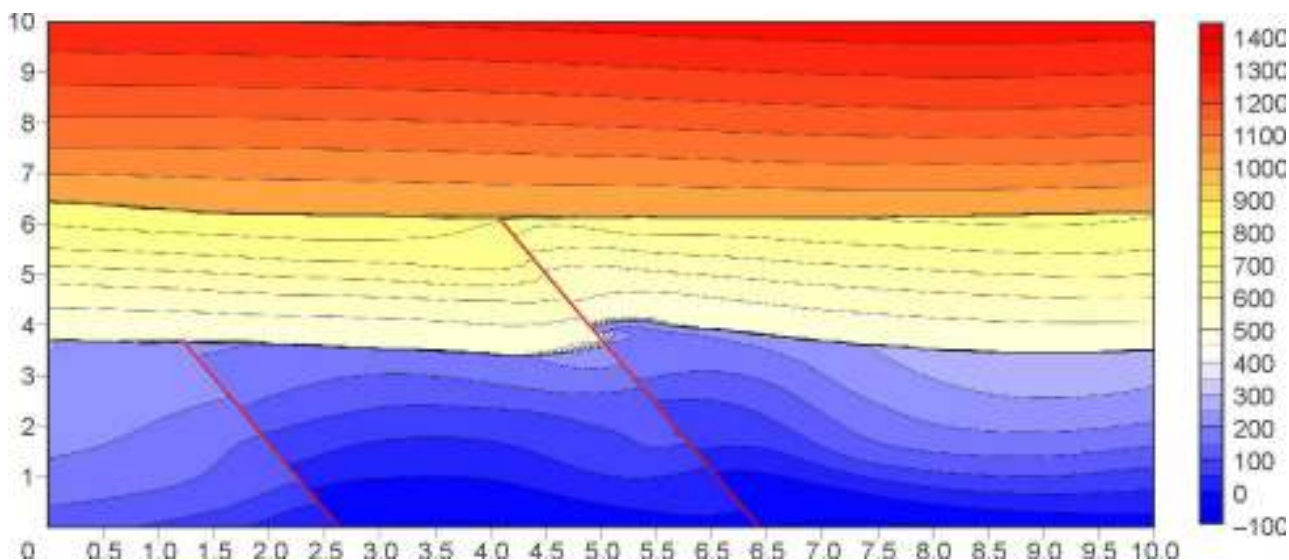


Рисунок 5.12 Вертикальное сечение трехмерной числовой модели с двумя поверхностями несогласия и разрывными нарушениями разной возрастной генерации.

Одной из технологий, предложенной для трехмерного пространственного моделирования геологических объектов, является gOcad [<http://www.gocad.org/w4/>]. Его основой является представление геологических трехмерных тел в виде дискретного набора связанных пространственных элементов – узлов. Физические и геологические свойства объектов, моделируются как переменные, заданные на этих узлах. Для слоистых сред, отдельные границы представляются в виде систем примыкающих треугольников, что позволяет генерировать поверхности практически любой формы. Основной особенностью gOcad, отличающей его от появившихся ранее пространственных систем автоматизированного проектирования (например, AutoCad) является, предложенный Jean-Laurent Mallet [1997, 2002], мощный интерполяционный инструмент. Этот метод интерполяции получил название «Discrete Smooth Interpolation» (DSI). С помощью DSI возможна оценка физических свойств, заданных в дискретных узлах (x, y, z), для любой области моделируемого 3D-пространства. Использование систем простых дискретных элементов (примыкающих треугольников для представления поверхностей и тетраэдров для объемов и других) [Berlioux, 2001] обеспечивает универсальный и гибкий инструмент, позволяющий решать структурные и гидродинамические задачи. При этом сетки, на которых выполняются вычисления могут сколь угодно сгущаться

в требуемых областях, таких как зоны рядом со стволами скважин в гидродинамических расчетах, зоны фациальных переходов и т.п. [Blessent, 2009].

В 2006 году компания Earth Decision, созданная ранее членами консорциума gOcad для коммерциализации программных решений, вошла в состав компании Paradigm. На сегодняшний день эксклюзивным владельцем программных решений, созданных в 90-е годы исследовательским консорциумом gOcad является компания Paradigm, и ряд решений Paradigm в области структурного, палеотектонического и фациального моделирования разработаны на платформе gOcad (Kine3D, SKUA и др.). В настоящее время Paradigm продолжает спонсировать современные работы исследовательского консорциума gOcad, этот проект продолжает успешно развиваться и позволяет создавать сложные реалистичные модели трехмерных геологических объектов, учитывающих несогласные залегания, разрывную тектонику, системы трещин, неоднородность используемых данных [Blessent, 2009].

## **5.7 Построение сеточных моделей сложнодислоцированных осадочных толщ**

Слоистость осадочных пород является их главным текстурным признаком, она обусловлена анизотропией распределения свойств. За исключением ряда особых случаев (рифовые постройки, заметная косая слоистость, когда нормали к микрослоистости заметно отличаются от нормалей к кровле и подошве вмещающей толщи на несколько градусов), для осадочных толщ можно считать, что максимально быстрое изменения свойств пород происходят ортогонально слоистости, а наиболее медленно – в направлениях плоскостей слоистости. В слабодислоцированных толщах нормаль к слоистости практически совпадает с вертикалью. Это обуславливает возможность построения детальных сеточных моделей для решения задач оценки распределения свойств, подсчета запасов и гидродинамического моделирования на базе вертикального смещения стратиграфических границ. Для отложений, не осложненных разрывными нарушениями, это могут быть регулярные прямоугольные сетки. Уже в слабодислоцированных толщах более эффективными оказываются сеточные

модели, геометрия которых определяется формой стратиграфических границ. Разбиение стратиграфического интервала плоскостями, параллельными кровле, подошве, или пропорциональными плоскостями, линейно сконструированными из кровли и подошвы – характерная черта таких конструкций.

Алгоритмы построения гридов, геометрически связанных с формами слоистых тел, реализованы в индустриальных программных комплексах геологического моделирования, например, *Petrel Schlumberger*, *RMS Roxar*, *GOCAD Paradigm* и ряде других – рисунок 5.13.

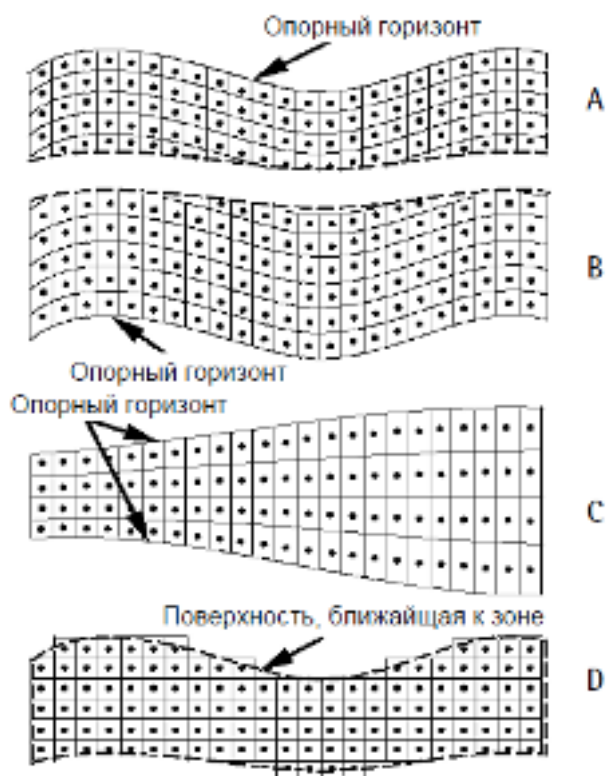


Рисунок 5.13 Типы гридов, получаемые вертикальным переносом границы резервуара [Руководство пользователя IRAP RMS Roxar, 2006].

В настоящее время предложено много типов гридов для геологического и гидродинамического моделирования резервуаров [Krogstad et al., 2008; Thom, Höcker, 2009]. Наибольшие трудности создают ситуации, связанные со сложными системами разрывов, для моделирования которых разработаны различные типы сеточных конструкций. Частным случаем сетки из локальных дискретных объектов можно считать так называемые *Corner Point Grid*, с ячейками, содержащими 8-угловых точек, при том, что некоторые из этих точек могут совпадать. Такие гриды применяются в продуктах *Petrel Schlumberger*, *RMS*

*Roxar*, средства моделирования на основе *MathLab* и других [Krogstad ets., 2008; Skaflestad, 2011]. Для моделирования геологических тел, осложненных разрывами, используются также четырехугольные сетки различной геометрии, в том числе с вложенными детализированными фрагментами [Волкова, 2006].

Одна из распространенных технологий – построение пилларных гридов (pillar grid), которые имеют границы дискретных ячеек, параллельные стратиграфическим поверхностям и плоскостям сместителей разрывов. Пилларные гриды применимы только для относительно простых структур разрывных нарушений. К их недостаткам также относят большой диапазон изменения размеров отдельных ячеек, что затрудняет выполнение некоторых расчетов с ними.

Более сложные сеточные модели позволяют аккуратно представлять осадочные толщи со сложной геометрией разрывных нарушений. Характерный пример – Jewel grid (или Faulted s-grid), пример которого взят из работы [Thom, Höcker, 2009] и представлен на Рисунке 5.14.

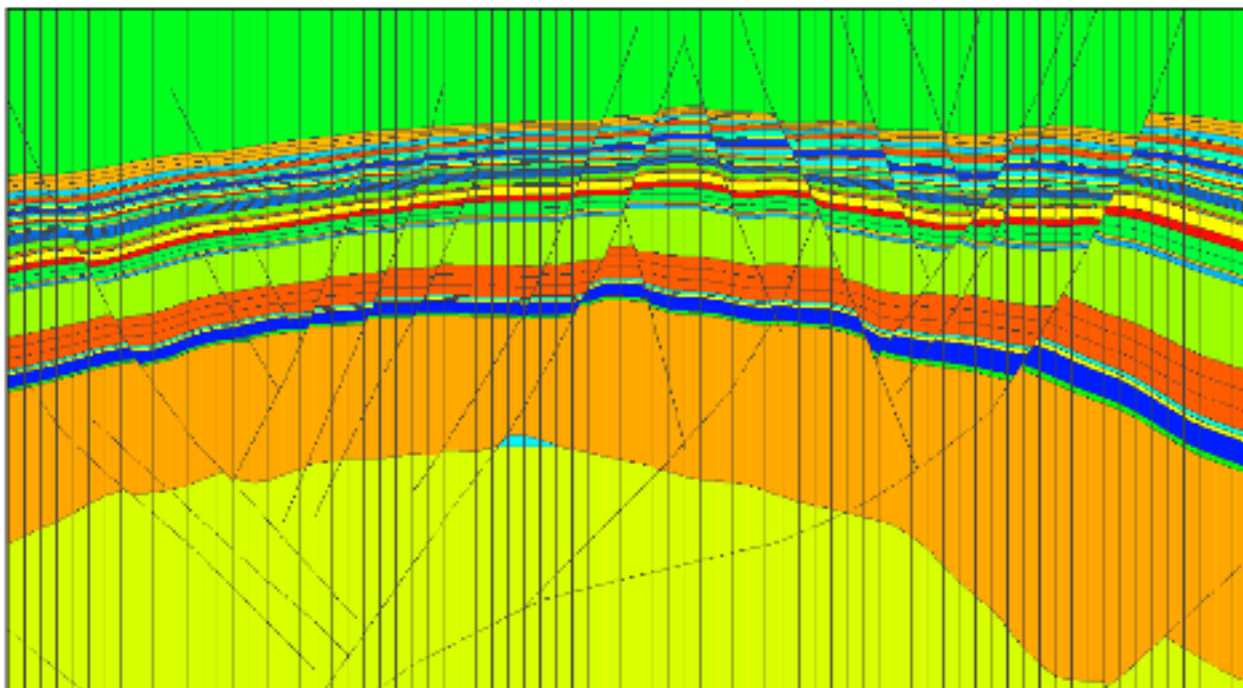


Рисунок 5.14 Jewel grid (или Faulted s-grid) [по Thom, Höcker, 2009].

Для существенно дислоцированных толщ, с крутыми углами наклонов и с опрокинутыми залеганиями слоев, большинство типов сеточных моделей не

пригодно. Одно из немногих решений, способное справиться со столь сложными задачами, – SKUA-grid Paradigm – Рисунок 5.15, основанное на технологических достижениях gOcad [<http://www.gocad.org/w4/>, [Introduction to 3D Geo modelling with gOcad, 2012]. SKUA-grid использует UVT-трансформацию [Jayr ets., 2008] переходя к естественным стратиграфическим координатам в которых вычисляются расстояния. Этот вид трансформаций является развитием Wheeler’s преобразования [Wheeler, 1958] и координата **T** отождествляется с геологическим временем (Time), соответственно она может быть криволинейной и локально ориентирована по направлению наибольшей изменчивости литологических свойств. Сетки данного вида, могут конструироваться с усеченными ячейками и быть адаптированными для решения гидродинамических задач [Dulac, Gringarten, 2011].

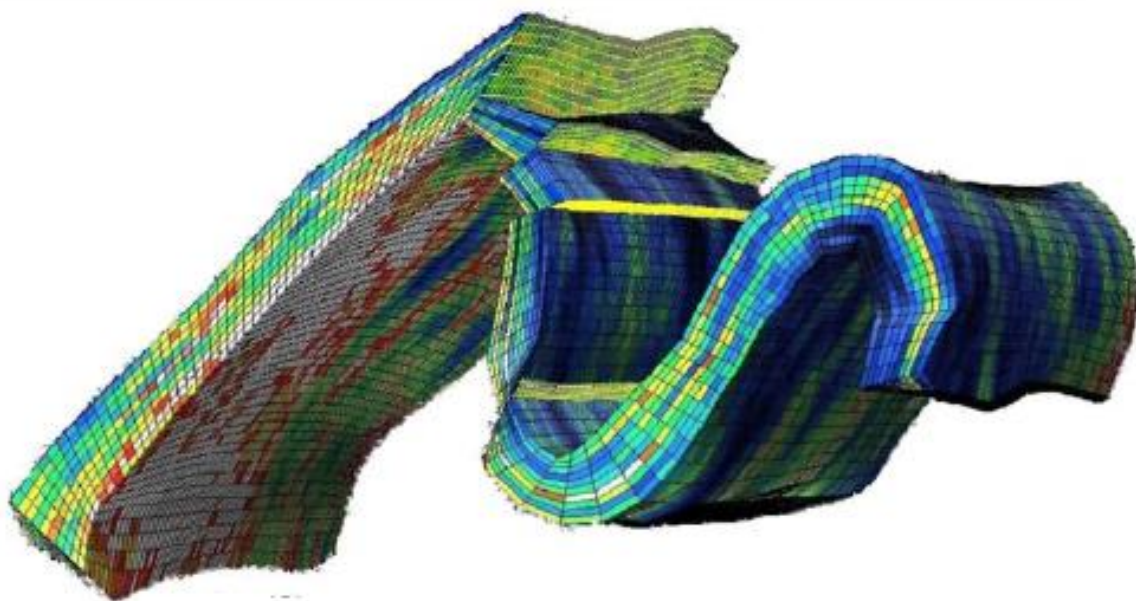


Рисунок 5.15 Пример использования SKUA-грида, созданного на основе технологий gOcad [Introduction to 3D Geomodelling with gOcad, 2012].

**Использование интегрального критерия при построении структурных гридов.** Создание наиболее сложных сеточных моделей, геометрия которых обусловлена существованием разрывных нарушений и изогнутостью поверхностей слоев (например, SKUA-грид), опирается на локальные свойства геологической среды – функции градиентов, ориентировки одного из направлений сетки по нормали относительно поверхностей слоев. В некоторых

случаях предпочтительнее оказываются интегральные характеристики, которые обладают большей устойчивостью. В частности, для достаточно толстых слоистых тел, линии, ориентированные по нормали к кровле могут взаимно пересекаться, а линии, соединяющие кровлю и подошву по кратчайшим расстояниям оказываться неоднозначными. Принципиальный пример таких ситуаций показан на Рисунке 5.16.

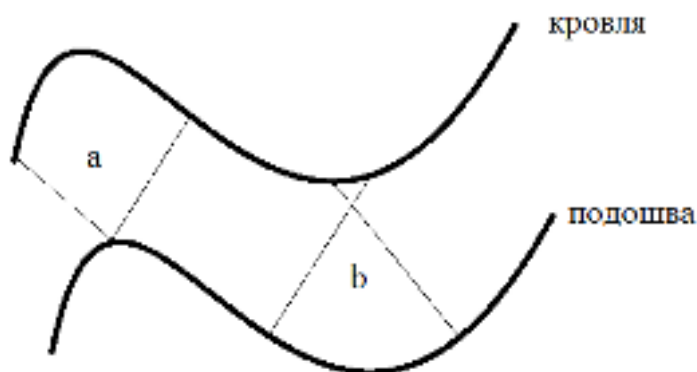


Рисунок 5.16 Неоднозначности при локальном конструировании сеточных моделей сильно дислоцированных слоев: а) относительно некоторой точки подошвы, разные точки кровли находятся на одинаковом минимальном расстоянии от нее; б) разные нормали к подошве пересекаются внутри слоя.

Для построения сеток с геометрией, зависимой от форм слоев, можно использовать следующую оптимизационную постановку. Пусть  $S_t \in R^2$  и  $S_b \in R^2$  – одномерные и однотипно параметризованные значением  $p$  области на кровле и подошве слоя соответственно (два сечения слоя). Под однотипной параметризацией понимаем, что значение параметра –  $p$ , каждой из этих областей возрастает в одном направлении и равномерно изменяется в диапазоне  $[0,1]$ . Например, оно равно 0 на границах левого сечения слоя, и равно 1 – на правом сечении, а изменения параметра линейны от длины сечения границы слоя, измеренного от его левой границы. Будем решать задачу нахождения взаимного отображения  $S_t$  и  $S_b$  с помощью двух функций  $S_t = F_t(p)$  и  $S_b = F_b(p)$ , которые обладают следующими свойствами:

1. Отображения неубывающие, то есть ситуация, показанная на Рисунке 5.16b недопустима.
2. Не отображаются точки, находящиеся по разные стороны от разломов.



3. Если  $d(x, y)$  - Эвклидово расстояние для произвольных точек  $x, y$ , то искомые отображения должны минимизировать функционал следующего вида  $\int_0^1 d(F_b(p), F_t(p)) dp \rightarrow \min$

Смысл второго выражения простой, надо получить такое отображение кровли пласта на подошву и наоборот, чтобы минимальной была интегральная по параметру  $p$  толщина пласта. Требуется оптимизировать сопоставление кровли и подошвы по критерию минимальной средней толщины пласта. Данная задача может решаться различными оптимизационными алгоритмами, в частности, нами использовался волновой алгоритм Ли [Lee, 1961].

**Примеры построения расчетных сеток.** На рисунке 5.17. показан пример построения сетки локальных элементов для модельного слоя сложной геометрии с разрывами.

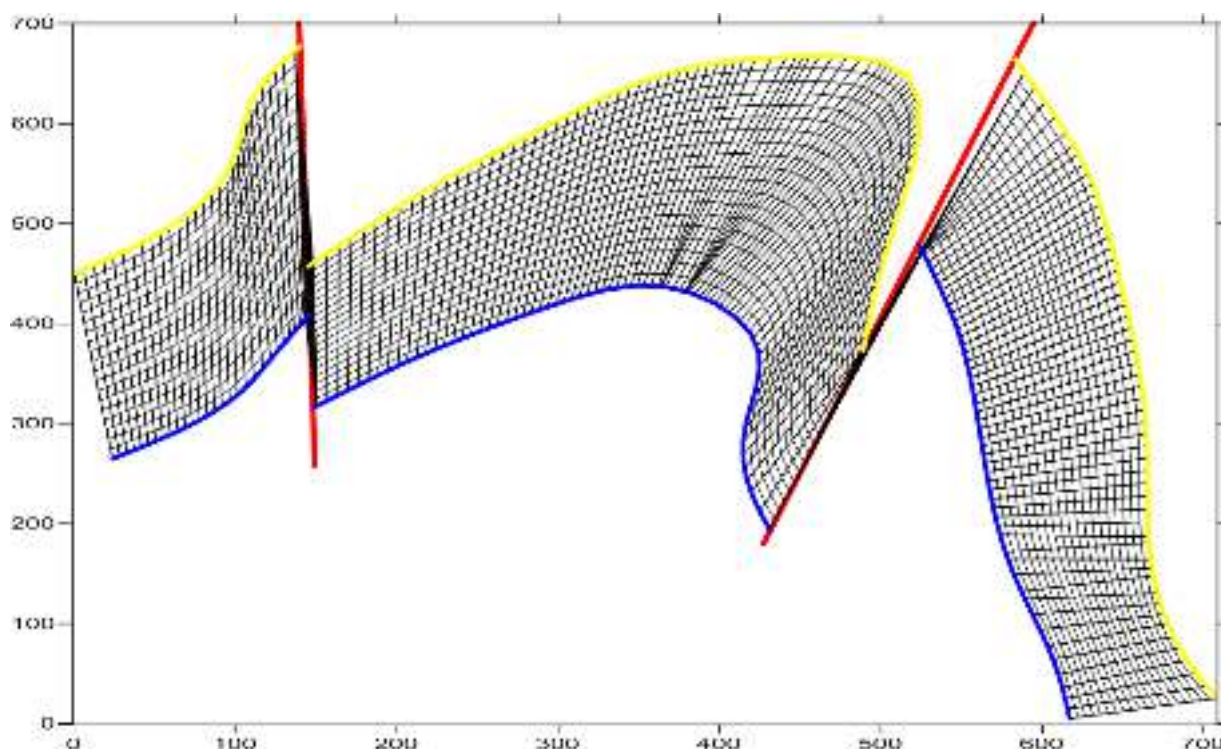


Рисунок 5.17 Сетка для слоя с опрокинутым залеганием, полученная путем оптимального сопоставления его кровли и подошвы с учетом разрывов.

Следующие особенности характеризуют полученное решение:

1. Сетка достаточно регулярна. Слой везде пропорционально разделен на одинаковое количество подслоев - «строки» грида, а средняя ширина каждого «столбца» грида – постоянна.

2. Столбцы сетки одновременно согласуются с разломами, внешними границами заданной области (разломы и границы имеют приоритет) и наилучшим образом (по критерию минимальной средней толщины слоя) задают сопоставление точек кровли и подошвы.

На следующем примере – рисунок 5.18 показан фрагмент одного из временных сейсмических разрезов Медвежьего газового месторождения и полученная для него непрерывная сеймостратиграфическая модель по методике, описанной в предыдущей главе настоящей работы и в работе [Лапковский, 2012].

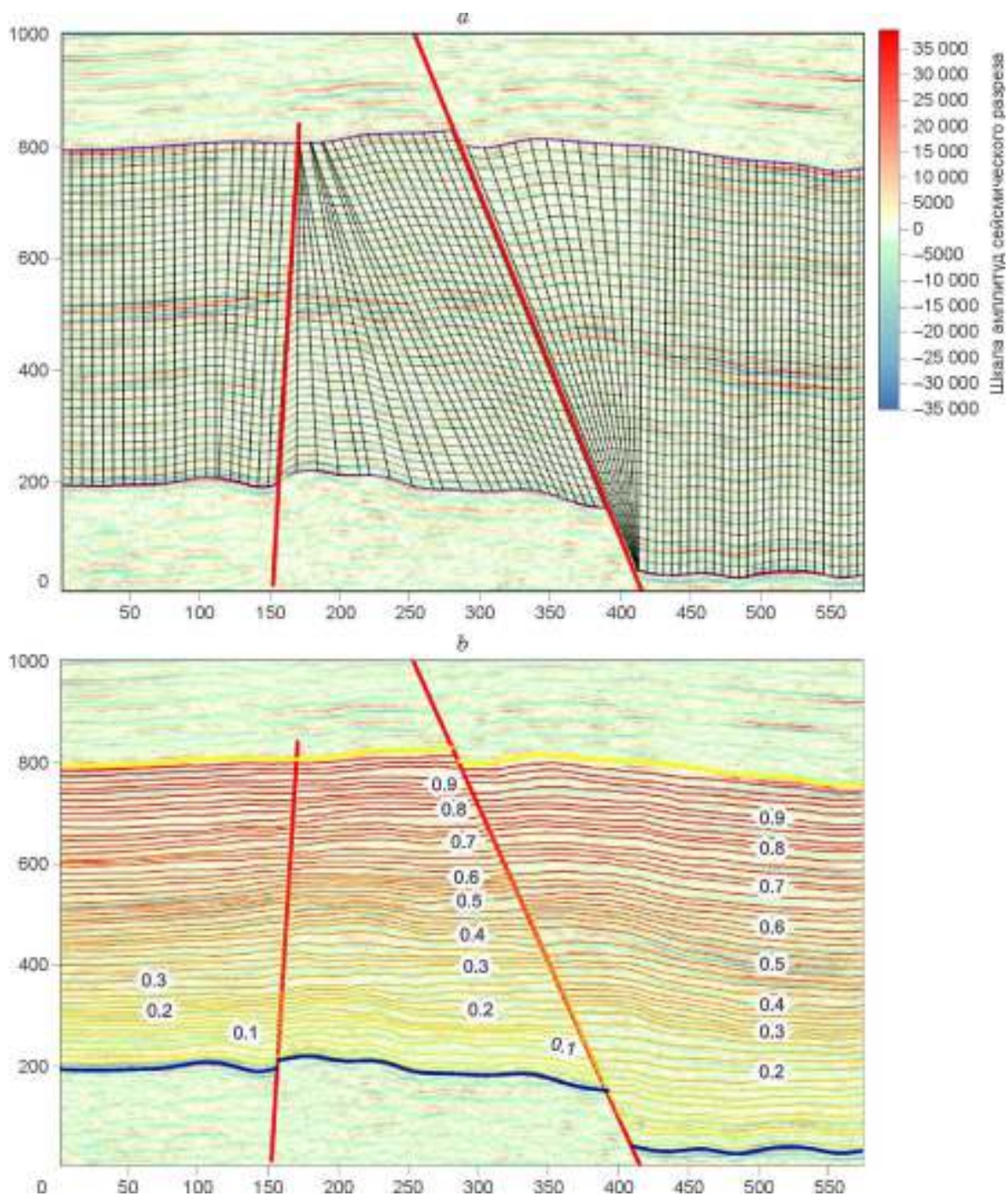


Рисунок 5.18 Пример стратиграфической модели временного сейсмического разреза. а) - разрез и грид, наложенный на него, учитывающий геометрию кровли и подошвы сейсмостратиграфического комплекса и выделенные линии разрывов; б) - непрерывная сейсмостратиграфическая модель.

В данном примере сетка, показанная на рисунке 5.18а, позволила трансформировать волновое поле в пространство Уиллера, после чего в нем была построена непрерывная сейсмостратиграфическая модель. Эта модель, затем обратно трансформирована в исходное пространство, а результат этих

преобразования показан на рисунке 5.18b в виде тонированного набора изолиний значений стратиграфической функции. Включить в модель разрывы и априорные представления о геометрии среды позволила именно технология получения структурно обусловленного грида.

## 5.8 Создание сейсмического куба по набору сейсмических разрезов

В данном разделе описывается уникальный метод создания 3D сейсмических кубов по набору 2D разрезов, реализованный в рамках программного комплекса *W-seis*. В основе предлагаемого решения лежит интерполяция волнового поля имеющихся сейсмических разрезов на трассы, вновь создаваемого куба. Близким аналогом, рассматриваемого метода, является созданная во ВСЕГЕИ технология построения кубов данных ГИС по результатам измерения в отдельных скважинах и с учетом структурных карт [Технология автоматизированной корреляции данных ГИС, 2012]. Для получения удовлетворительного результата необходимо выполнение нескольких условий:

1. Сейсмические разрезы 2D должны иметь близкие динамические характеристики, желательно, чтобы эти разрезы были получены по единой технологии и прошли общую обработку.
2. Разрезы должны образовывать связную группу с большим числом пересечений друг с другом.
3. Для хорошей интерполяции одинаковых фаз разных разрезов желательно наличие нескольких карт  $T_0$ , покрывающих область построения сейсмического куба.

На Рисунке 5.19 показан скриншот работающей программы *W-seis* в момент задания параметров, необходимых для создания куба по набору пересекающихся 2D разрезов. При этом, обязательными являются параметры, задающие геометрические свойства создаваемого куба (координаты левого нижнего угла, расстояние между ин-лайнми и кросс-лайнми, число ин-лайнов и кросс-лайнов, угол поворота куба, начальное время, конечное время и шаг дискретизации), имя файла, в который

сохраняется сейсмический куб. Необязательным, но желательным, является задание набора карт T0, сформированных в доступных для W-seis форматах гридов.

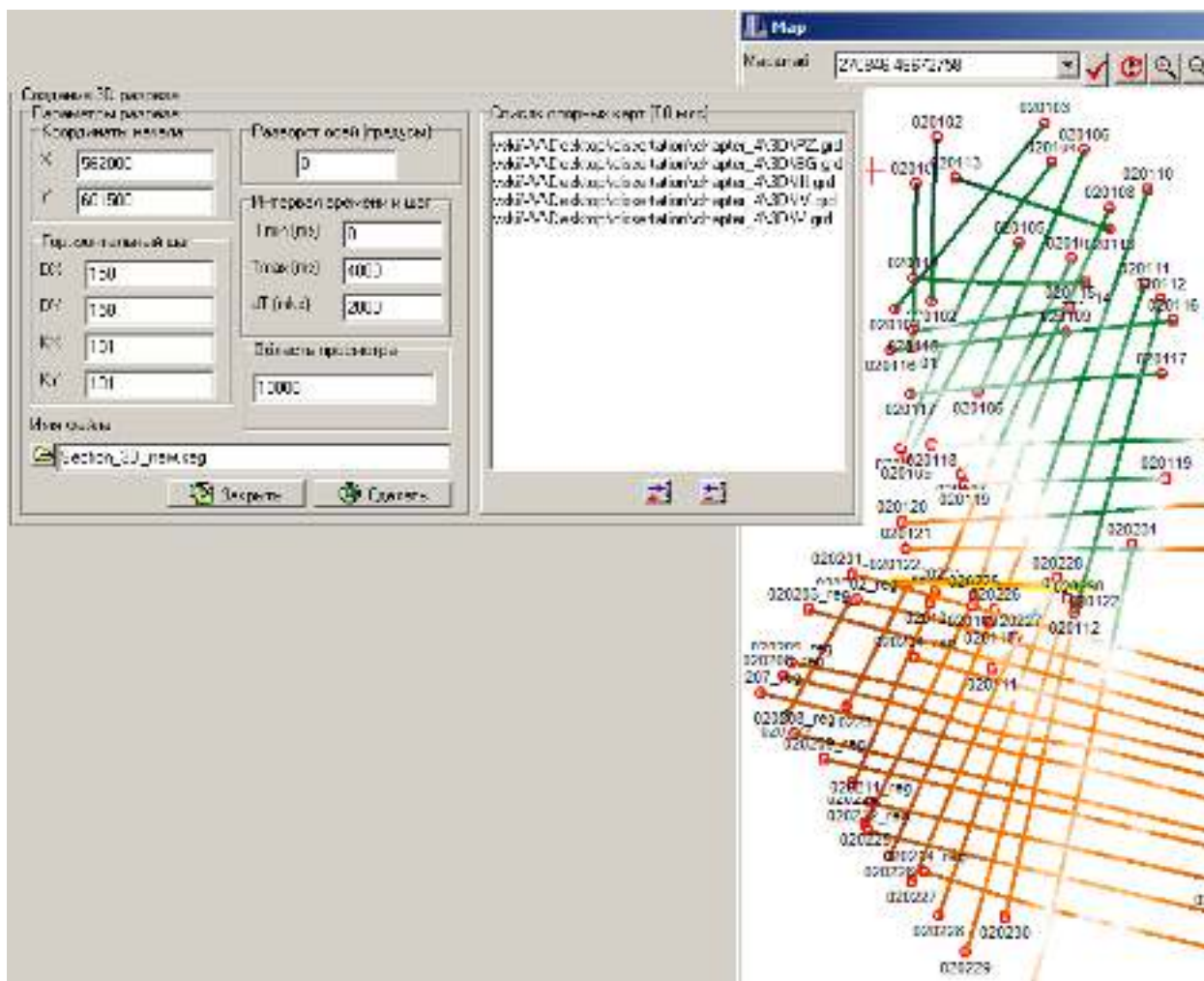


Рисунок 5.19 Копия экрана монитора, показывающая работу программы W-seis при создании сейсмического куба по набору 2D разрезов.

Работа процедуры создания сейсмического куба сводится к следующему:

1. Последовательно генерируются трассы. Для каждой трассы, с учетом её положения на планшете, определяются ближайшие несколько трасс соседних разрезов (не более шести).
2. По значениям амплитуды сигнала на этих трассах, вычисляются значения всех амплитуд генерируемой трассы. Для этого амплитуды соседних трасс суммируются с весами, обратно пропорциональными от расстояния между каждой исходной и генерируемой трассой.

3. При наличии опорных отражающих горизонтов, значения с исходных трасс выбираются во временах с учетом этих горизонтов (используется пропорциональная модель соответствия). Если опорные горизонты не заданы – значения амплитуды исходных трасс выбираются на тех же уровнях времен (или глубин при работе с глубинными разрезами), что и на создаваемой трассе.
4. Результирующий разрез сохраняется в файл в формате seg-y.

Пример, сгенерированного по набору разрезов, представленному на Рисунке 5.19, сейсмического куба показан на Рисунке 5.20. Полученный куб был загружен в программный комплекс Petrel Schlumberger, средствами которого выполнена визуализация этого результата.

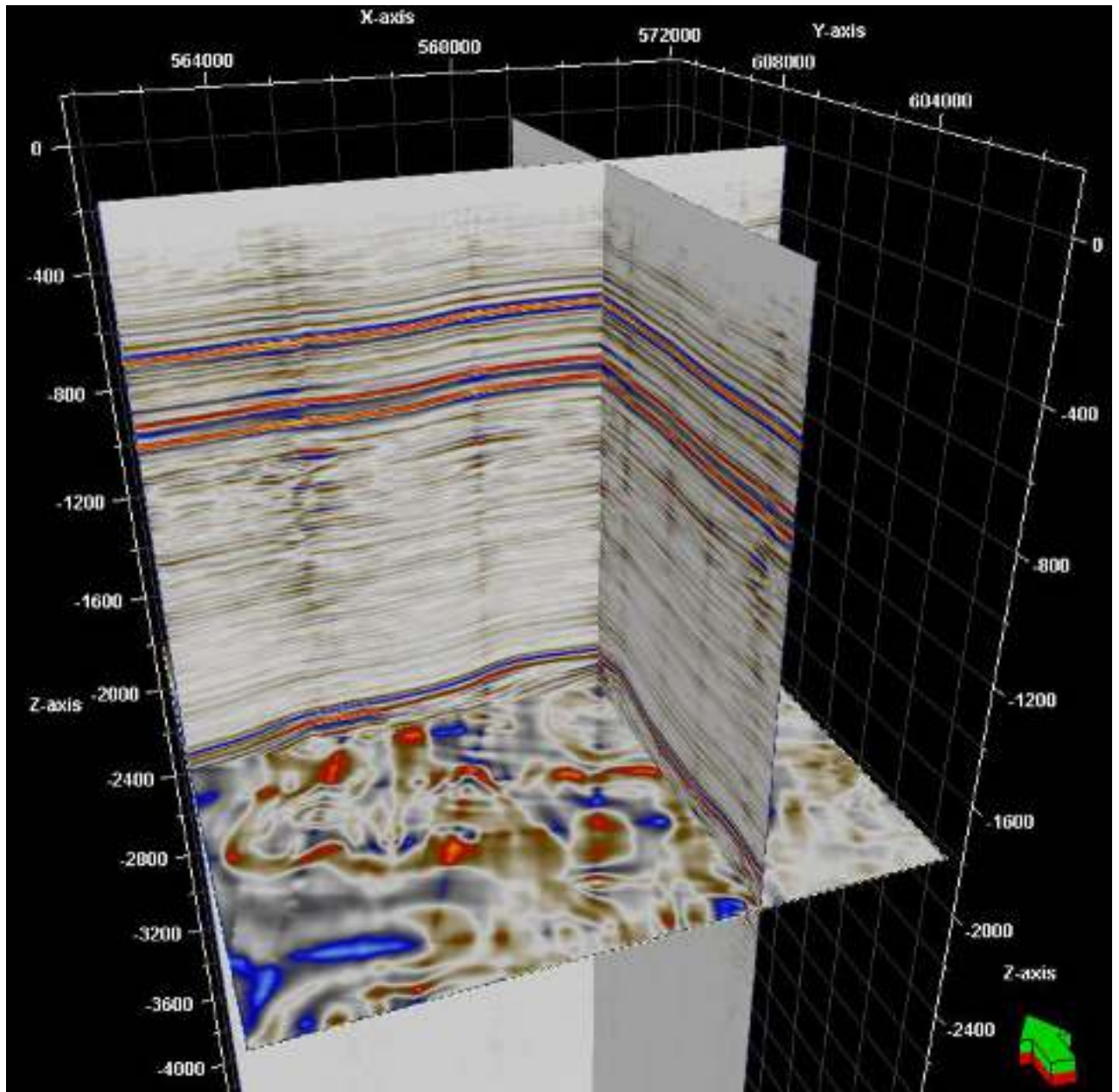


Рисунок 5.20 Пример сейсмического куба, сгенерированного из набора 2D разрезов и загруженного в комплекс Petrel Schlumberger, визуализация в 3D окне.

### Выводы:

1. Наиболее универсальными и отвечающими потребностям построения адекватных геологических моделей, являются методы аппроксимации поверхностей, основанные на сплайн-функциях и кригинге. В обоих этих случаях решается оптимизационная задача, связанная либо с минимизацией функционала энергетического типа (сплайны), либо с минимизацией дисперсии погрешности в оценке геостатистической переменной (кригинг).

2. В рамках этих подходов, автором предложены решения, применимые для технологически-эффективного двухкомпонентного моделирования поверхностей осложненных разломами, а также поверхностей с заданными ограничениями на максимально и минимально допустимые значения.
3. На основании решения оптимизационной задачи – нахождения наилучшего взаимного отображения кровли и подошвы некоторой толщи, предложен подход к построению неортогональных сеток для создания моделей сложных геологических объектов.
4. Предложена и программно реализована технология создания 3D куба по набору 2D сейсмических разрезов.



## ГЛАВА 6 ТРАНСФОРМАЦИИ И АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

*Как много мы знаем и как мало понимаем.*

*Альберт Эйнштейн*

### **6.1 Необходимость преобразования моделей при изучении геологических объектов**

Построение любой модели не является самоцелью. Как инструмент познания она предоставляет возможность воздействовать на себя различными способами и анализировать последствия этих воздействий. При математическом моделировании важнейшим, как с точки зрения оценки качества, устойчивости и воспроизводимости, так и с точки зрения исследования характеристик объекта является оценка того, как меняется модель при изменении параметров её построения или под действием некоторых операторов.

При построении моделей поверхностей геологических объектов, их приходится различным образом преобразовывать – сглаживать, вклеивать фрагмент одной модели в другую, делать логико-арифметические преобразования, вычислять различные дифференциальные формы. Некоторые процедуры преобразования вполне тривиальны, например, преобразование координат. Их реализация требует усилий, но не является научной задачей. Программные продукты, к созданию которых я имею непосредственное отношение, содержат десятки операций над геологическими моделями, но в данной главе обсуждаются лишь несколько из них, в которых имеется научное содержание.

### **6.2 Дифференциальные преобразования моделей геологических поверхностей**

При анализе структуры геологических поверхностей большое значение имеет вычисление дифференциальных форм – производных, модуля градиента, кривизны, лапласиана, энергии изгиба. Одна из первых работ, где для

геологической интерпретации геометрических свойств поверхностей слоев использовались дифференциальные преобразования, была выполнена М.Д. Белониным и И.М. Жуковым [1968]. Для непрерывных и гладких форм, вычисление дифференциальных характеристик - вполне тривиальная задача. Однако, ее перенос на объекты, имеющие разрывы, может иметь разные трактовки. Как правило, при использовании регулярных прямоугольных сеток, дифференциальные формы вычисляются на основе значений в соседних узлах без учета положения этих узлов относительно линий разрывов. Представляется, что игнорирование разрывов не лучшее решение, вот почему. Допустим, у нас имеется реальная геологическая граница, терпящая разрыв с амплитудой 100 м. Мы можем проигнорировать этот разрыв при вычислении модуля градиента поверхности. Тогда получаемые нами значения будут зависеть от шага регулярной сети. Так значение 0,1 мы получим при шаге сети 1000 м, а 5 - при шаге 20 м. Вряд ли нас бы устроила вычислительная процедура оценки мощности слоя или его пористости, которая давала бы результаты, отличающиеся в десятки раз в зависимости от параметров выбранной регулярной сети. Можно отказаться от вычисления дифференциальных характеристик в узлах, непосредственно примыкающих к разрывам. Но тогда, мы рискуем получить большие белые пятна на картах, построенных для участков со сложной тектоникой. Исходя из этого, процессы вычисления соответствующих дифференциальных форм, реализованы на основе значений в узлах, находящихся **по одну сторону от разрывов** (либо справа, либо слева).

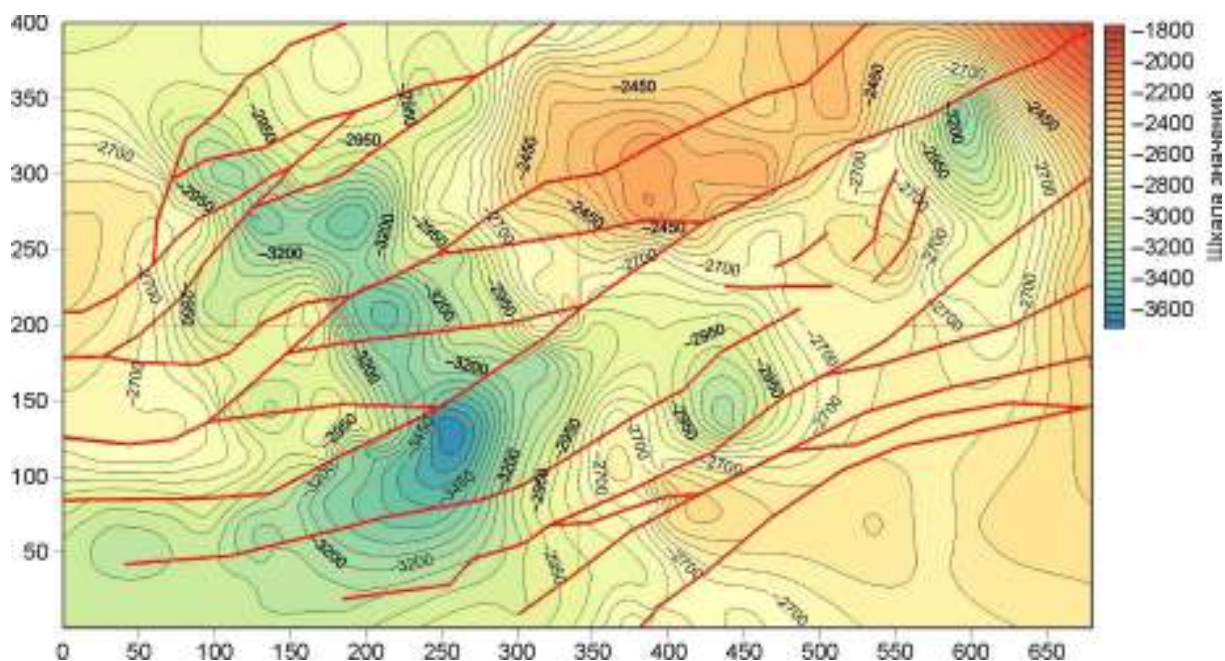


Рисунок 6.1 Модель структурной поверхности с разрывами, абсолютные значения глубин в метрах.

На Рисунке 6.1 показана карта поверхности, осложненной большим числом разрывных нарушений. Для этой модели выполнено вычисление значений модуля градиента – Рисунок 6.2 без учета разрывных нарушений.

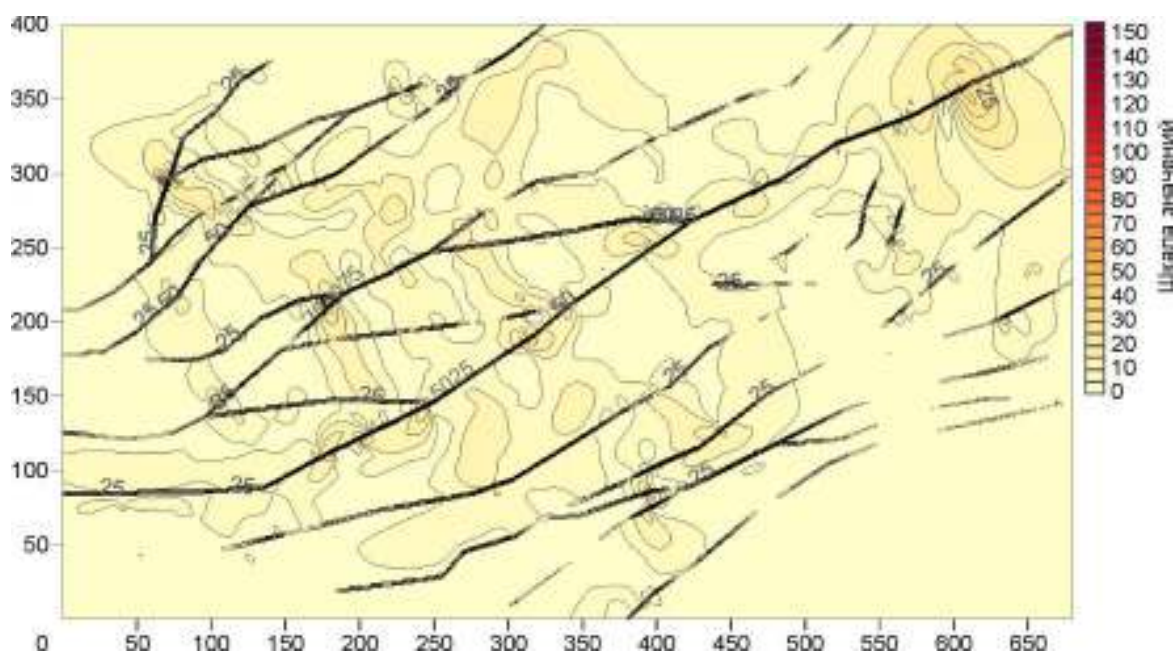


Рисунок 6.2 Карта модуля градиента, полученная без учета разрывов.

Аналогичная карта, построенные с учетом разрывов поверхности, показана на рисунке 6.3. Эти карты существенно отличаются, и несомненно, более

информативной и, соответственно, предпочтительной является последняя. Там, где разломы реально существуют, но они игнорировались при вычислении дифференциальных характеристик, разрывы забирают в себя значительную долю аномалий карты. Уже на картах модуля градиента это вполне выражено, но более существенно данный эффект проявляется при вычислении дифференциальных форм, связанных с производными второго порядка (лапласиан, средние и полные кривизны, распределение энергии изгиба). Значимые аномалии, которые появляются на картах, полученных без учета разрывов, трассируют лишь линии самих разрывов. Поскольку положение разрывов было известно уже при построении структурной поверхности, никакой новой информации это нам не дает.

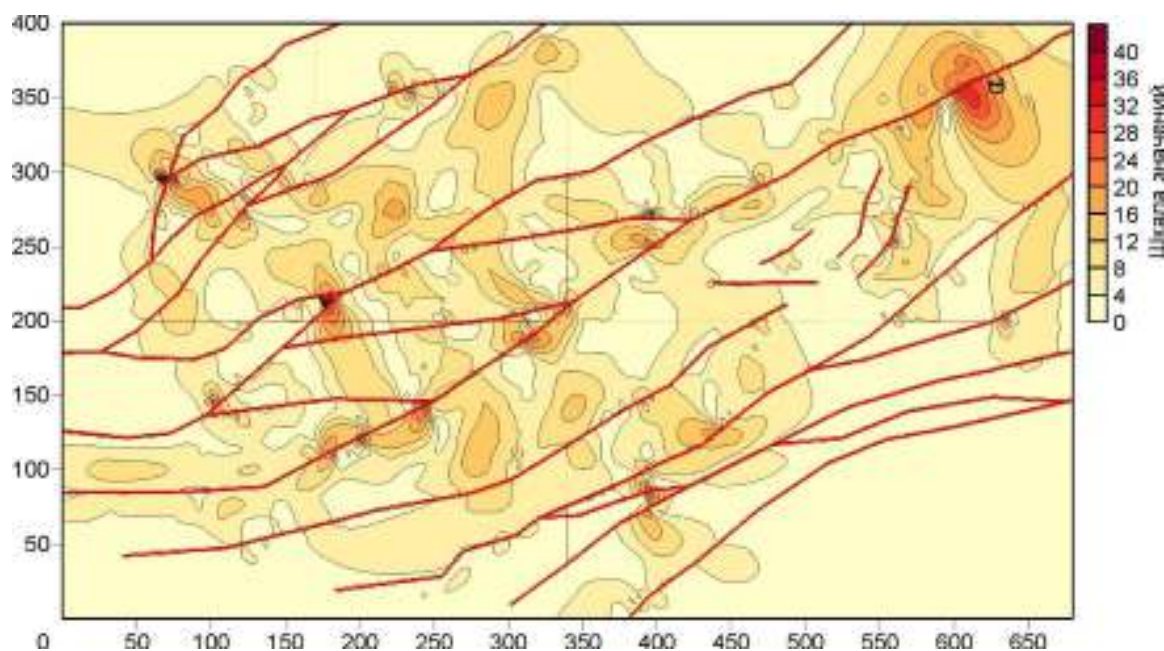


Рисунок 6.3 Карта модуля градиента, полученная с учетом разрывов.

### **6.3 Выделение типовых геоморфологических и тектонических форм поверхностей слоев с применением вращающихся палеток**

Принято различать тектонические, эрозионные и аккумулятивные формы рельефа. Бывает, что реальный рельеф формируется под воздействием сочетания нескольких факторов.



Рисунок 6.4 «Лестница» террас в устье Чуи (фото автора).

На Рисунке 6.4 показана великолепная «лестница» террас в районе впадения р. Чуи в р. Катунь (Алтай). Эти террасы были предметом изучения многих исследователей. В своей книге «Мои Путешествия по Сибири» Владимир Афанасьевич Обручев так описывал их: «Большой особенностью пейзажа в долине р. Катунь являются две, а местами даже три террасы, в обрывах которых видны яснослоистые наносы — мелкие галечники и пески, отложенные в прежние времена рекой на дне долины; позже река была вынуждена врезать свое русло опять в свои же отложения, что ясно доказывает недавние поднятия, вызывавшие усиление уклона дна долины, т. е. увеличение скорости течения воды, и в результате новое углубление русла.». В.А. Обручев считал, что эти террасы возникли благодаря тектоническим причинам. В настоящее время большинство специалистов считают, что самые выраженные террасы образованы при катастрофических сбросах воды - спиллвэям из ледниково-подпрудных озер Чуйской, Курайской и Кокоринской впадин [Рудой, 2010]. Однако, независимо от принятой версии возникновения подобных объектов, важно правильно устанавливать их морфологические элементы. Решение этой задачи может достигаться вычислением мер сходства фрагментов исследуемых поверхностей с одним из пяти типов вращающихся анизотропных палеток – рисунок 6.5.

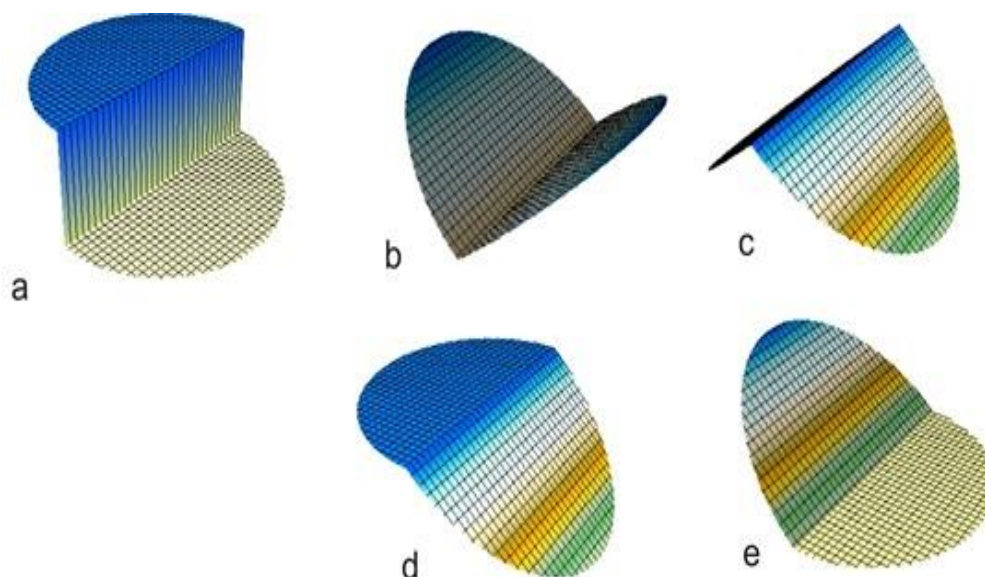


Рисунок 6.5 Типы вращающихся анизотропных палеток. а – уступ, b – тальвег, с – гребень, d – бровка террасы, e – тыловой шов террасы.

Для каждой палетки есть одно направление, по которому её рельеф не меняется. Это направление назовем «ориентация палетки». Если проектировать точки любой палетки на вертикальную плоскость, ортогональную ориентации палетки, то все точки лягут на некоторую линию.

Оценка сходства реальных форм с выбранной палеткой выполняется следующим образом: задается горизонтальный размер области сравнения - радиус. Центр шаблона последовательно совмещается со всеми узлами анализируемой числовой модели поверхности. Для каждого узла палетка вращается вокруг вертикальной оси (число поворотов задается), тем самым меняется ориентация палетки. Затем, для каждого поворота, вычисляется степень похожести рельефа на покрывающие его фрагмент палетки. В качестве меры похожести принят коэффициент корреляции. Выбор этой меры позволяет не заботиться о различии вертикальных масштабов реальной поверхности и шаблона. При этом мера похожести оказывается различной при вращении шаблона вокруг вертикальной оси, соответственно можно найти положение лучшего совпадения и значение коэффициента корреляции для этого совпадения. Эта величина, умноженная на масштабный коэффициент, который определяется диапазоном изменения значений амплитуд анализируемой поверхности в окрестности вращающегося шаблона, и является результирующим индикатором. При вычислении данных мер сходства, из рельефа анализируемой поверхности

может быть локально удалена трендовая компонента (1-й или 2-й степени), это может быть полезно особенно при исследовании эрозионных форм погребенного рельефа, который после формирования был искажен тектоническими движениями.

Формально мы вычисляем следующую величину

$$r_{xy}(\alpha) * Scale \quad (6.1),$$

где  $r_{xy}(\alpha)$  – коэффициент корреляции фрагмента реальной поверхности и выбранной палетки, повернутой на угол  $\alpha$ ;  $Scale$  – масштабный коэффициент. Если за  $Scale$  принять стандартное отклонение рельефа –  $S_y$ , а палетку отмасштабировать так, чтобы её стандартное отклонение было равно единицы  $S_x=1$ , то из (6.1) имеем:

$$s_y r(\alpha)_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{1} \quad (6.2).$$

То есть тогда, мы будем вычислять ковариацию участка рельефа и повернутую на некоторый угол палетку.

Этот процесс иллюстрируется рисунками 6.6 и 6.7.

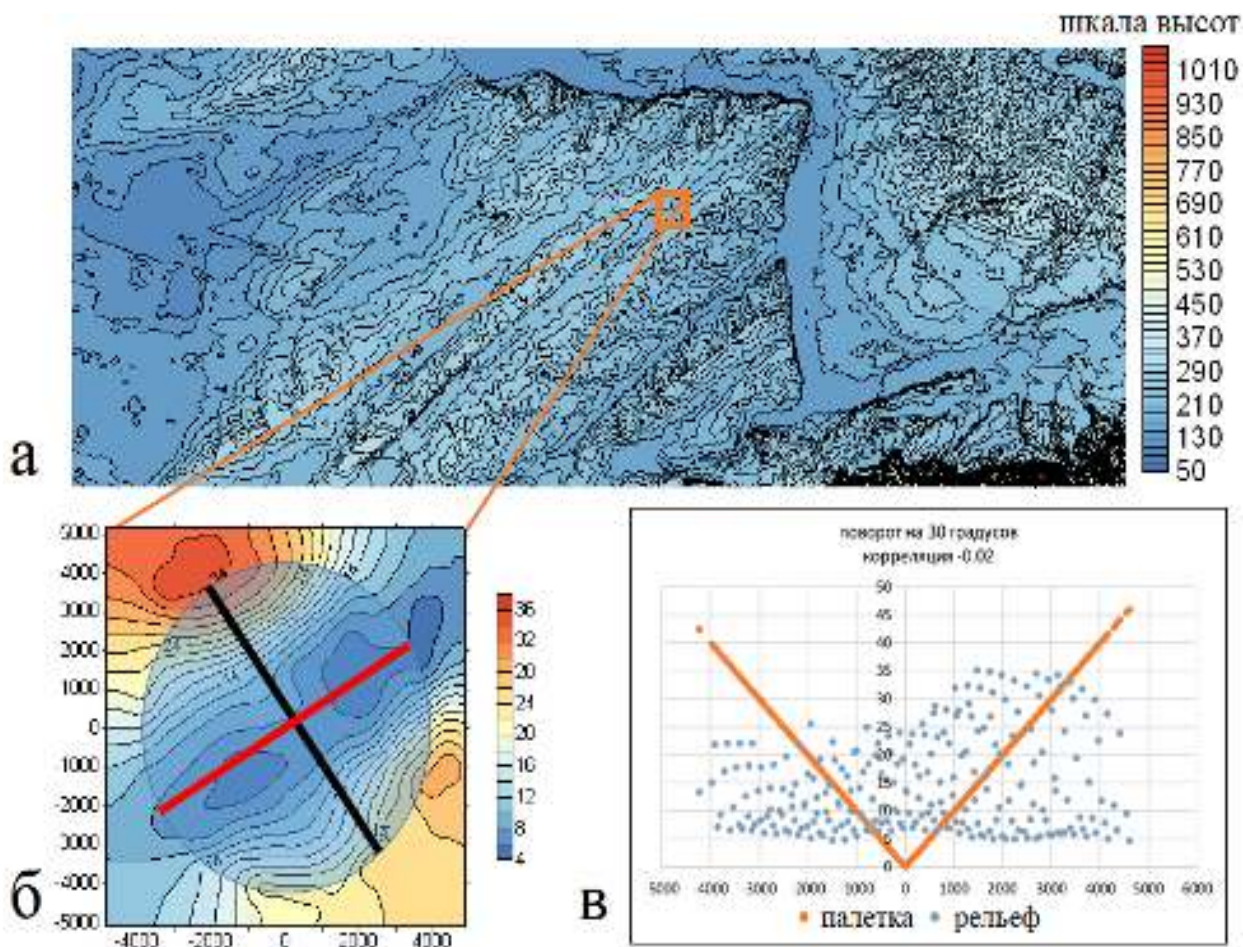


Рисунок 6.6. Принцип анализа рельефа с помощью вращающихся палеток. **а** – карта анализируемой поверхности рельефа, оранжевый квадрат – «скользящее окно», с которым в данный момент совмещена выбранная палетка; **б** – увеличенный фрагмент рельефа и палетка, покрывающая его (полупрозрачный круг), черная линия – ориентация палетки, красная – ориентировка вертикальной плоскости проекции; **в** – проекция точек палетки (оранжевая) и точек рельефа, при повороте оси палетки на 30 градусов относительно направления на север.



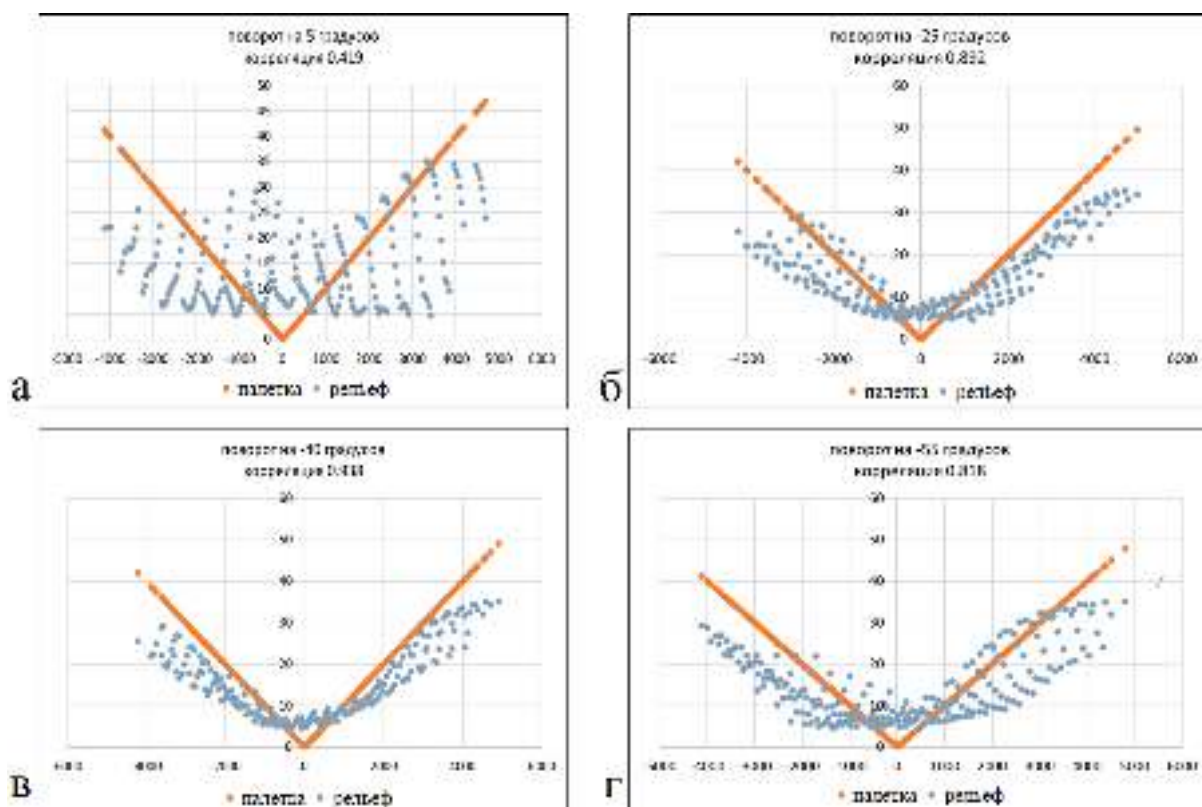


Рисунок 6.7. Изменение коэффициента корреляции рельефа и вращающейся палетки типа «талвег»: **а** – ориентация палетки 5 градусов, **б** - ориентация палетки -25 градусов; **в** - ориентация палетки -40 градусов; **г** - ориентация палетки -55 градусов.

На рисунке 6.6 показаны вся карта анализируемого рельефа – 6.6а, его фрагмент с которым в данный момент совмещена палетка типа «талвег» - 6.6б. На этом примере ориентация палетки составляет 30 градусов, это направление показано черной линией на рисунке 6.6б. Ортогональная к ней красная линия показывает ориентировку вертикальной плоскости, на которую проектируются точки рельефа и точки палетки, имеющие те же координаты.

Рисунок 6.7 показывает, что при вращении палетки вокруг вертикальной оси (соответственно, меняется ориентация палетки и ориентация плоскости, на которую проектируются точки рельефа и палетки), коэффициент корреляции ее поверхности и рельефа, покрываемого палеткой, меняется. На данном рисунке, максимальное значение коэффициента корреляции 0.938 (рисунок 6.7в) получено при ориентации палетки -40 градусов относительно направления на север (положительное направление поворота – против часовой стрелки). При ориентации +30 градусов – рисунок 6.6в, коэффициент корреляции составил

незначимые  $-0.02$ . Таким образом задача оценки сходства реальной поверхности с одной из типовых форм, является оптимизационной задачей, поскольку ищется положения наилучшего соответствия с максимизацией для разных палеток или коэффициента корреляции, или его модуля. При этом сам поиск оптимального соответствия основан на полном переборе всех возможных ориентаций палетки.

Данный метод изначально был реализован автором как одна из процедур программ *GridBuilder-GridMaster*. Позднее совместно с Валерием Алексеевичем Бердовым и Александром Александровичем Власовым это решение было реализовано для программного комплекса *Petrel Schlumberger* в виде плагина, разработанного в среде Ocean. В октябре 2012 году этот инструмент был представлен на российском конкурсе разработчиков плагинов, проводимым *Schlumberger* и был удостоен второго места.

В 2014 году к пяти, приведенным на рисунке 6.5 шаблонам, была добавлена возможность оценивать локальное сходство поверхности, и с центрально симметричными формами, что может быть полезным при обнаружении таких объектов, как вулканические постройки, трубки взрыва, ударные кратеры, курганы и другие.

### **6.3.1 Выделение эрозионных форм рельефа**

На Рисунке 6.8 приведен пример построения поля сходства поверхности рельефа с бровками террас. Рассматриваемая территория расположена в Восточной Африке, все линейные размеры на рисунке приведены в метрах. Модель рельефа скачана из публичных баз данных результатов радарных съемок. В данном районе рельеф достаточно расчлененный, врезы долин, относительно поверхностей выравнивания, достигают 200 метров, поэтому в качестве одной из диагностируемых форм избраны бровки террас.

Области высокого сходства с бровками террас отмечены красными и оранжевыми цветами на карте вычисленного параметра. Эти области достаточно хорошо ложатся на участки рельефа, которые визуальнo идентифицируются именно как бровки террас. Чтобы убедительно представить это соответствие, были построены два совмещенных графика по линии I-II – на Рисунке 6.8b, один

из которых показывает значение высоты рельефа, а другой вычисленную меру сходства. Хорошо видно, что бровки террас (Ряд 1) совпадают с положительными экстремумами графика меры сходства (Ряд 2).

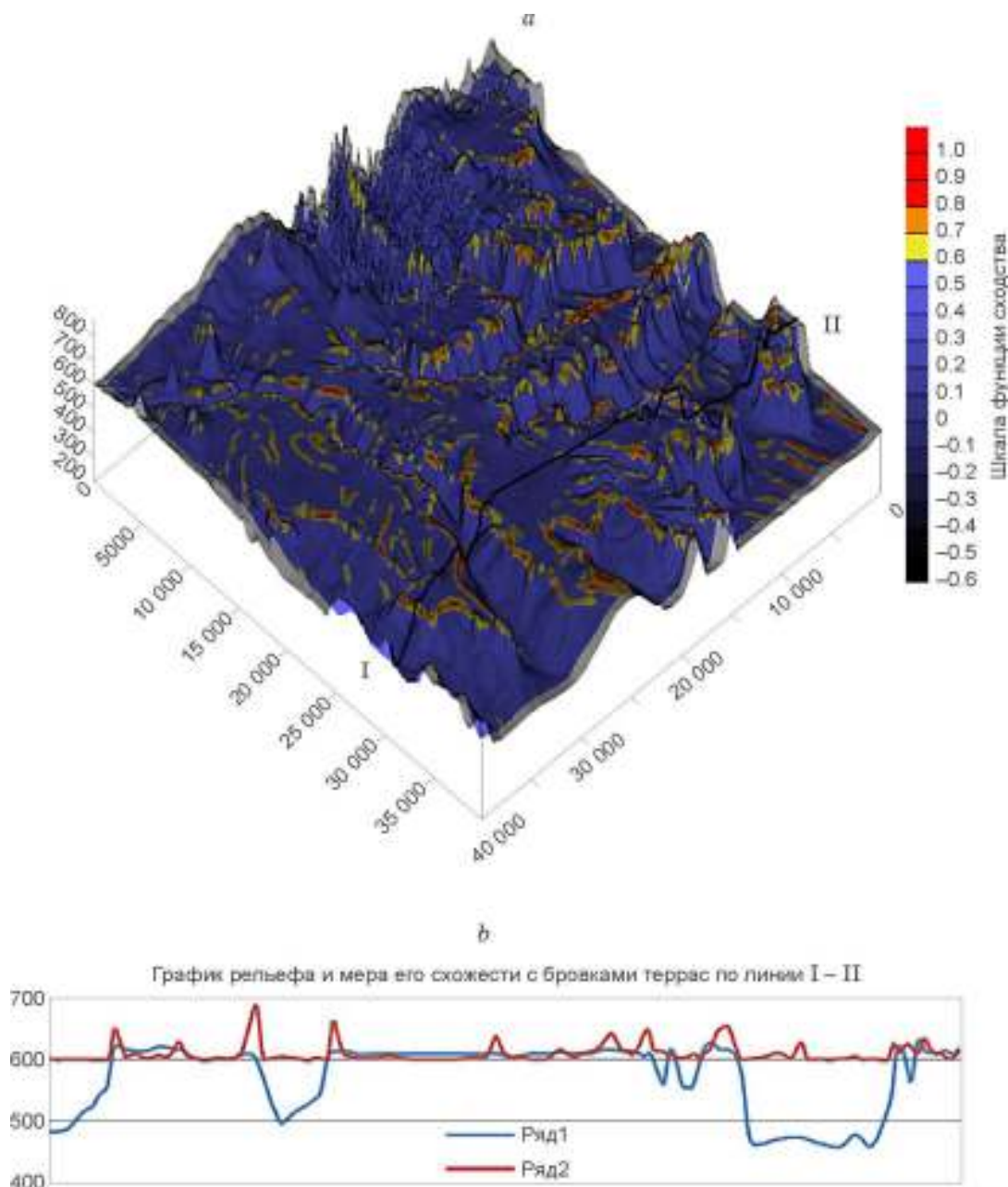


Рисунок 6.8 Пример эрозионного рельефа земной поверхности одного из районов Восточной Африки с наложенной функцией его схожести на бровки террас. а – рельеф и функция сходства с бровками террас, б – профиль по линии I-II высоты рельефа (ряд 1) и сходства с бровкой террас (ряд 2).

Для рельефа данного района, в целом, характерно наличие высоких эрозионных останцов конической формы. Бровки террас местами рассечены боковыми оврагами временных водотоков. При этом на них также образуются цепочки обособленных овальных поднятий. Эта особенность четко проявляется,

если вычислить меру сходства с центрально симметричными формами рельефа –

Рисунок 6.9.

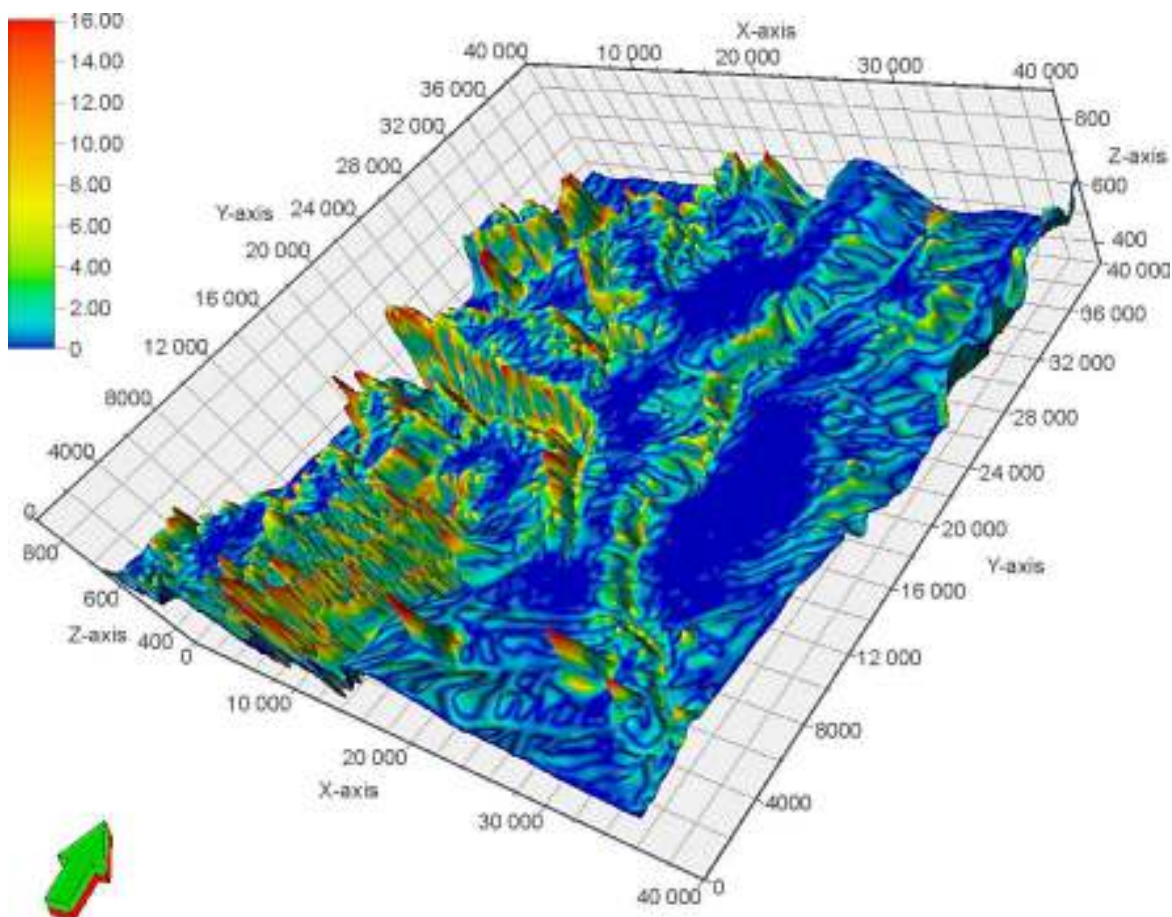


Рисунок 6.9 Пример эрозионного рельефа с наложенной функцией его похожести на центрально симметричные формы.

Другой пример применения метода вращающихся анизотропных палеток к анализу форм рельефа относится к югу Западной Сибири – рисунок 6.10. Здесь на территории Алтайского края и Новосибирской области растут реликтовые ленточные боры. Они протягиваются на расстояние до 400 километров и ориентированы с северо-востока на юго-запад по сети стока, вызванного таянием ледников последнего оледенения. Большое количество песчаного материала в руслах водотоков создало благоприятные условия для произрастания здесь сосны.

В геоморфологическом отношении это ложбины с небольшими речками и цепочками озер, и разделяющие их гряды. Обращает на себя внимание их линейность, субпараллельность и чередование на выдержанном расстоянии. Здесь находится зона сочленения глыбово-складчатых сооружений горной системы Алтая и Западно-Сибирской эпигерцинской платформы. На схеме новейшей

тектоники Алтая, представленной в работе [Новиков, 2004] в этой области находится левосторонний сдвиг-всброс, простирание сместителя которого близко к линейным структурам рельефа северо-восточного простирания данной территории. Учитывая, что речные системы часто закладываются по зонам тектонических нарушений, такое совпадение представляется естественным.

С этих позиций (существование современного регионального сдвига-взброса и окружающих его деформаций) оценим результаты вычислений, представленные на Рисунке 6.10.

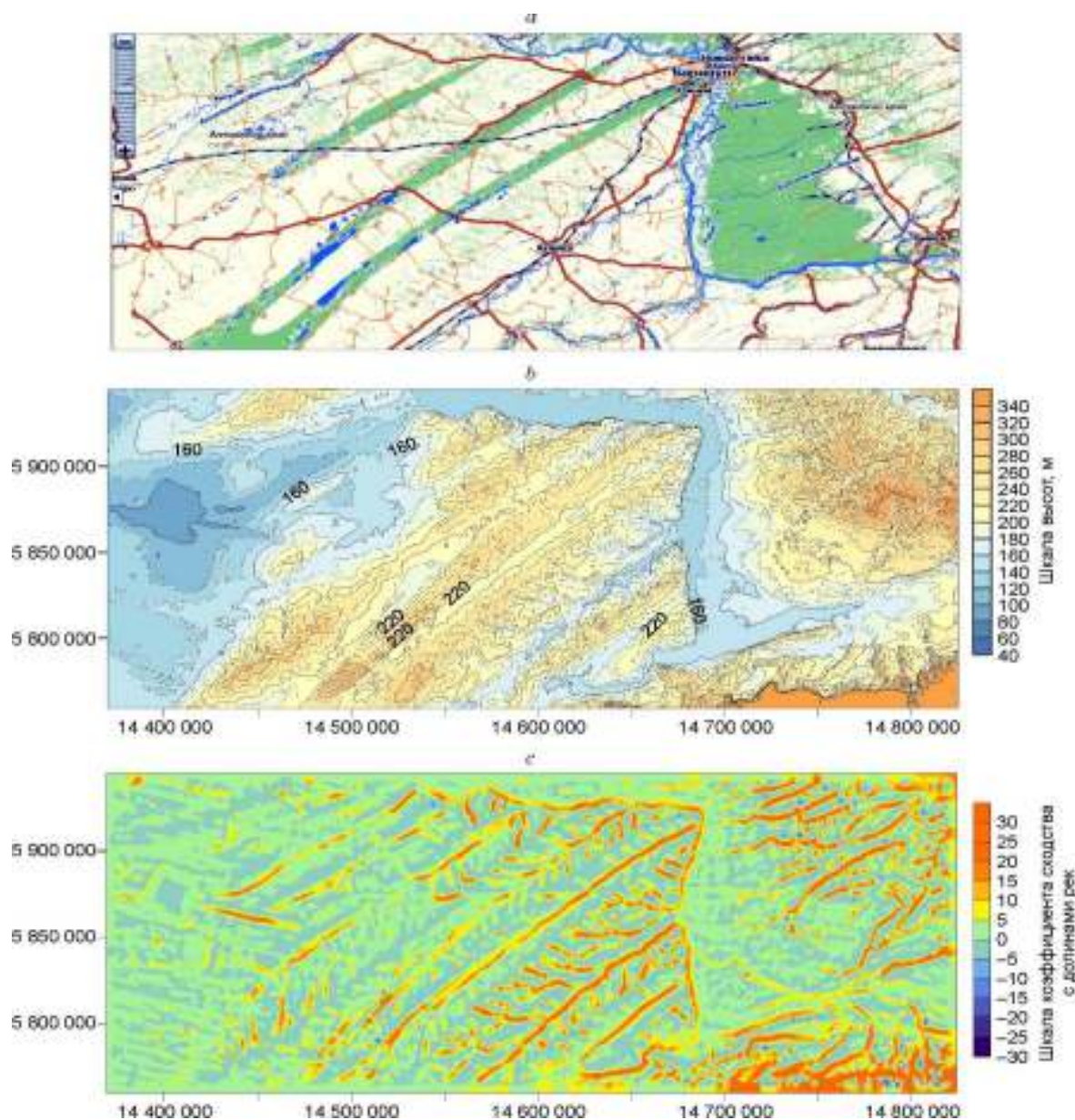


Рисунок 6.10 Рельеф зоны ленточных боров Алтая и карта коэффициентов сходства с речными долинами: а – копия фрагмента цифровой географической карты района (копия из Yandex); б – карта изолиний цифровой модели рельефа; с – карта коэффициентов подобия, построенная по цифровой модели рельефа.

Для лучшего ориентирования, на Рисунке 6.10а показана географическая карта местности с нанесенными на ней основными населенными пунктами, дорогами, руслами рек, озерами и лесными массивами. Карта 6.10b – показывает современный рельеф, полученный из открытой цифровой базы данных. Это поле высот позволило вычислить с помощью асимметричной вращающейся палетки характеристическую функцию, локальной похожести данного поля на формы рельефа типа тальвег - карта 6.10с. Высокие значения данной функции точно соответствуют положению речных долин.

Этот результат не является банальным, по следующей причине. Безусловно, все долины видны и на карте изолиний исходного рельефа, но само значение высоты, не может быть функцией, характеризующей принадлежность точки местности к типу рельефа – днищу долины. Долины располагаются на разных высотах. То есть, если надо, например, построить оценку вероятности обнаружения палеодолины и, соответственно, ее русловых отложений, то поля глубин для этого не подходят (хотя визуально долины на них видны). Поле рисунка 6.10с для решения этой задачи подходит, поскольку оно является функцией максимального соответствия (при разных поворотах) с одной из идеальных форм долины.

Есть особенности, которые не слишком бросаются в глаза на рисунке 6.10b, но которые заметны на рисунке 6.10с. Это система линеаментов, имеющих достаточно выдержанное простирание около 100 градусов. Данная система относительно мелких тальвегов особенно заметна юго-западнее Алейска.

Известно, что при образовании крупных сдвигов возникают оперяющие (касательные) разрывные нарушения более мелкого порядка [Осокина и др., 2008; Стефанов, Бакеев, 2012]. В приведенных статьях также показано, что в зависимости от времени формирования оперяющих разломов относительно времени хрупкого разрушения среды, в главном разломе эти оперяющие системы имеют с ним различный угол. Возможно, отмеченные линеаменты, являются проявлением в рельефе разломов, оперяющих региональные сдвиги.

Некоторые заметные линеаменты основного направления левобережья Оби можно проследить через широкую речную долину, заполненную современными

осадками, на правый берег в район южной части Приобского поднятия. Это также является косвенным свидетельством того, что речные долины данного ранга связаны с тектонически нарушенными зонами, а не являются исключительно поверхностными образованиями, пусть они и связаны с таянием покровных ледников.

Выделяется необычная, почти горизонтальная линейная зона изменения значений поля в центральной части карты 5.8с. Возможно, она связана с одним из разломов, который не принадлежит ни к основной, ни к оперяющей системам. Этот объект практически не виден на исходной карте рельефа.

Приведенный пример показывает, что вычисление таких характеристических функций, с помощью вращающихся палеток, позволяет обнаружить новые детали рельефа, это очевидно относится как к современному рельефу, так и к погребенному. В последнем случае, значения соответствующей характеристической функции могут участвовать в прогнозе зон палеорусел и промытых аллювиальных песчаников.

#### **6.3.2 Типизация рельефа района Новосибирского Академгородка на основе карт мер сходства с шаблонными формами**

Основой для написания данного раздела послужили результаты, полученные путем вычисления локальных мер сходства рельефа района Новосибирского Академгородка с анизотропными палетками. Исходные данные для этой работы были любезно предоставлены автору И.Д. Зольниковым. Эти материалы явились одной из фактографических основ при выполнении масштабной работы по анализу динамики экосистем данного района [Динамика экосистем ..., 2013], выполненной большим коллективом зоологов, ботаников, экологов и геоморфологов. Благодаря этому, у автора имеется возможность сравнить результаты детального и качественного геоморфологического анализа, проведенного в рамках традиционных подходов и рассчитанных полей мер сходства.

Район исследования расположен в южной части Новосибирска, он занимает прямоугольную территорию размером 10.2 км. на 6.11 км. площадью более 70 км<sup>2</sup>. Его схематичная карта показана на рисунке 6.11.

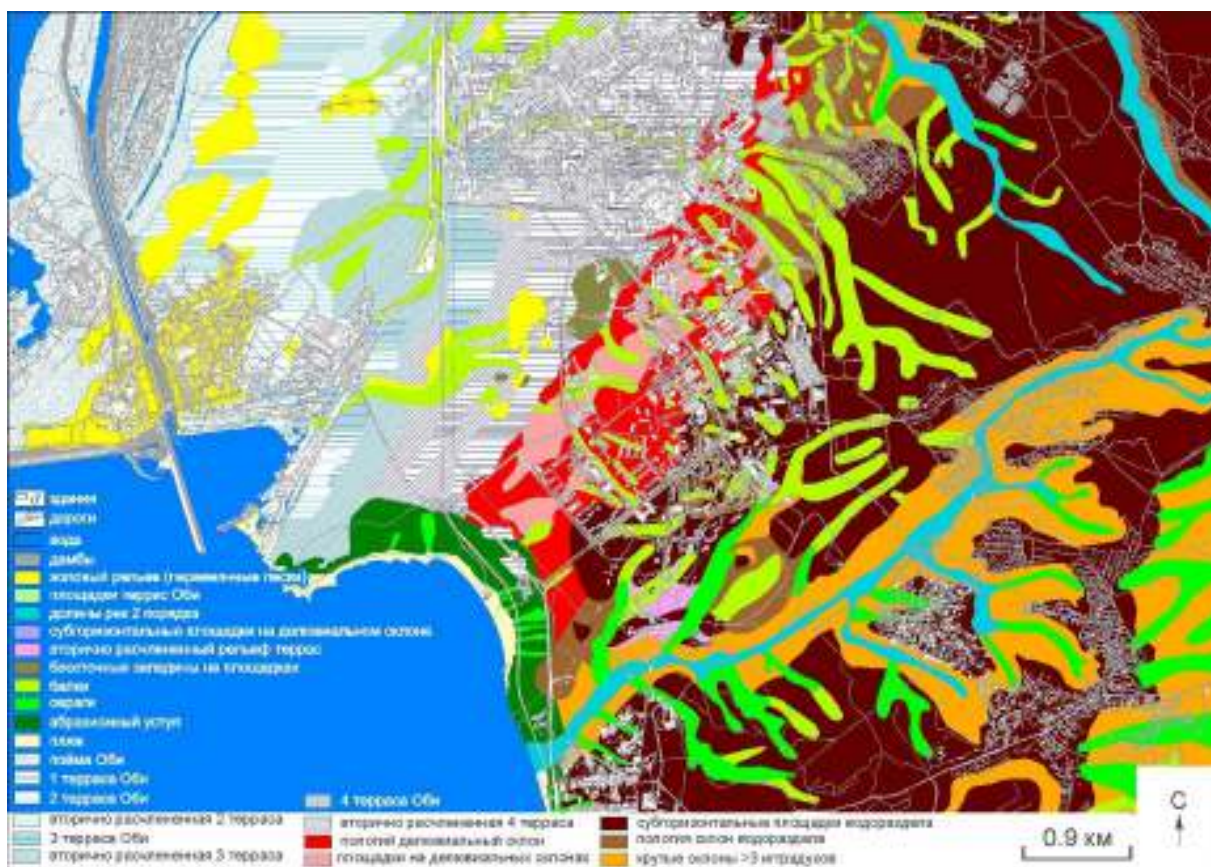


Рисунок 6.11. Основные типы ландшафтов района исследования (приведено по [Динамика экосистем ..., 2013]).

Было построено несколько карт атрибутов рельефа для данной площади. Карта сходства с уступами – рисунок 6.12, показывает существование нескольких зон аномально больших значений – левый берег р. Обь непосредственно ниже плотины водохранилища, северо-восточный участок территории – правый борт долины р. Нижняя Ельцовка и юго-восточный участок, где высокие значения соответствуют бортам оврагов и береговому уступу Обского водохранилища. Кроме этого, высокие значения меры сходства с уступами оказались на участках техногенного вмешательства – дамба водохранилища и борта обводного канала.



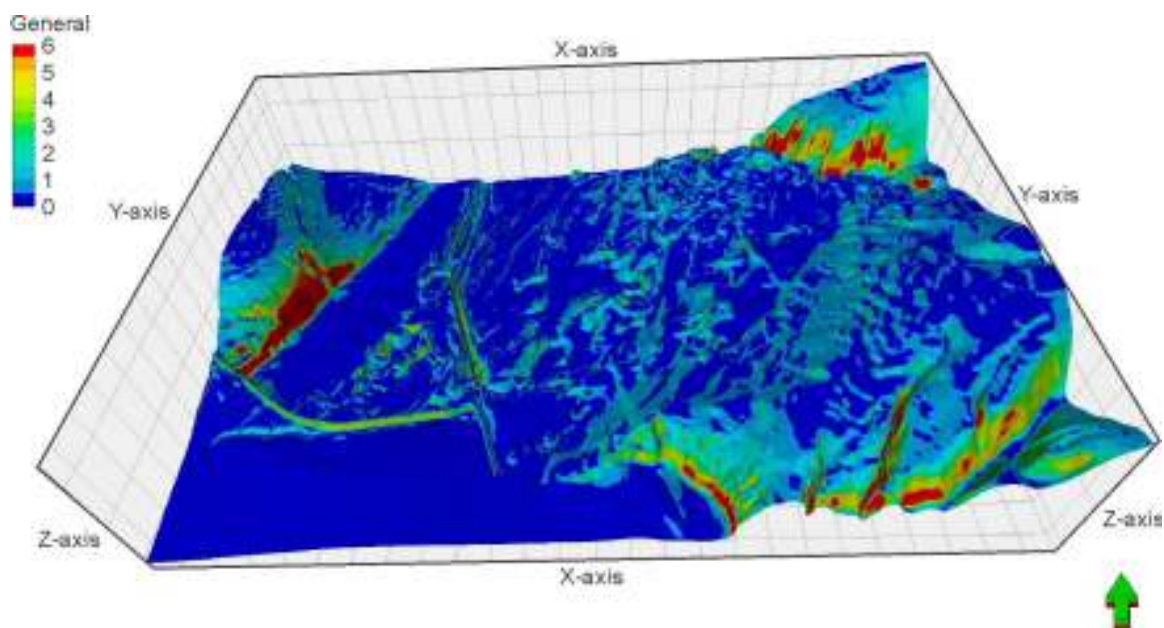


Рисунок 6.12 Карта меры сходства рельефа района Новосибирского Академгородка с шаблоном «уступ».

Минимальным значением поля (однородный синий тон) соответствует водные поверхности Обского водохранилища и реки Обь. Имеются также две области с достаточно низкими, но не однородными значениями меры сходства – в восточной части района на максимальных высотах водораздела, и в правобережье Оби в области её поймы. Эти области разделены зоной более высоких значений поля сходства, которое соответствует делювиальному склону с наложенными эоловыми формами рельефа.

На карте 6.13 показан результат вычисления меры сходства форм рельефа с шаблоном «тальвег». Высокими областями поля сходства отмаркированы днища оврагов, временных водотоков, притоков Оби, а также линии судоходного канала, и области под крытыми склонами уступов у русла Оби и водохранилища.

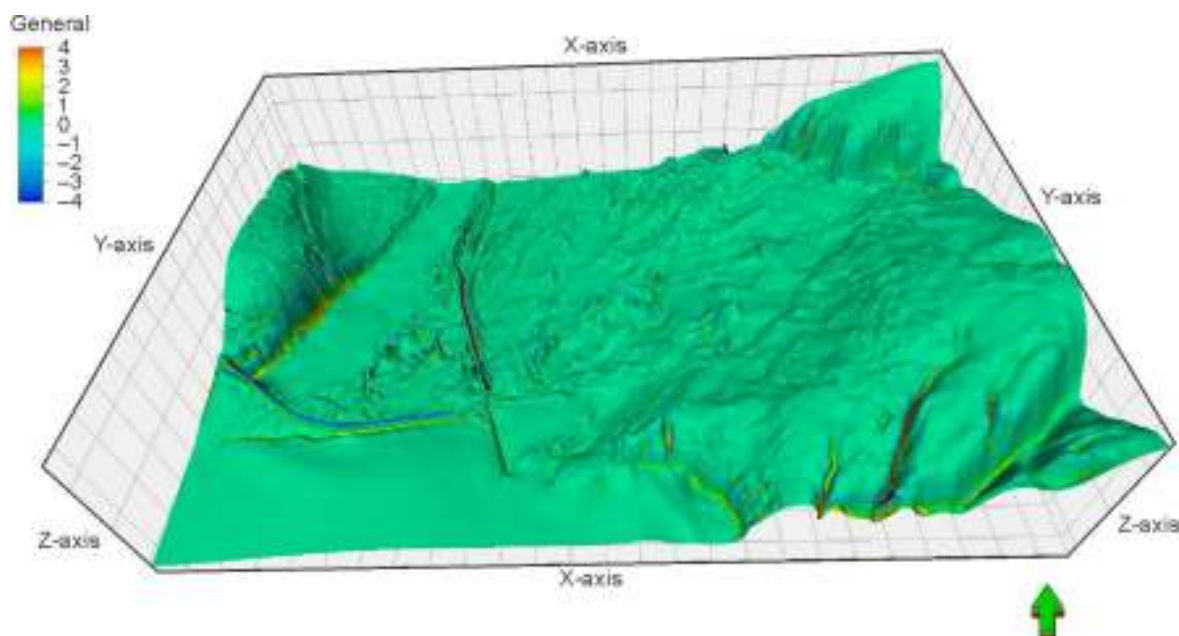


Рисунок 6.13 Карта меры сходства рельефа района Новосибирского Академгородка с шаблоном «талвег».

Последняя из этой серии карт – рисунок 6.14, показывает меру сходства рельефа с шаблонной формой «бровка террасы». На этой карте корректно выделяются бровки террас, имеющие значительную вертикальную амплитуду, более детальный анализ фрагмента карты, на правом борту долины Оби показал, что экспертно выделенные границы различных геоморфологических элементов – поймы, 1-2 и 2-й террас, лишь частично совпадают с областями повышенных значений соответствующего атрибута. На взгляд автора, это обусловлено полиморфностью элементов рельефа данной области, а именно, наложением эловых форм рельефа на поверхности выравнивания речных террас. Следует также заметить, что предложенный метод морфологического анализа позволяет весьма детально изучать отдельные, изначально представляющиеся как однородные формы (склоны, эловые постройки и др.), что показывает его полезность при изучении форм современного и погребенного рельефа.

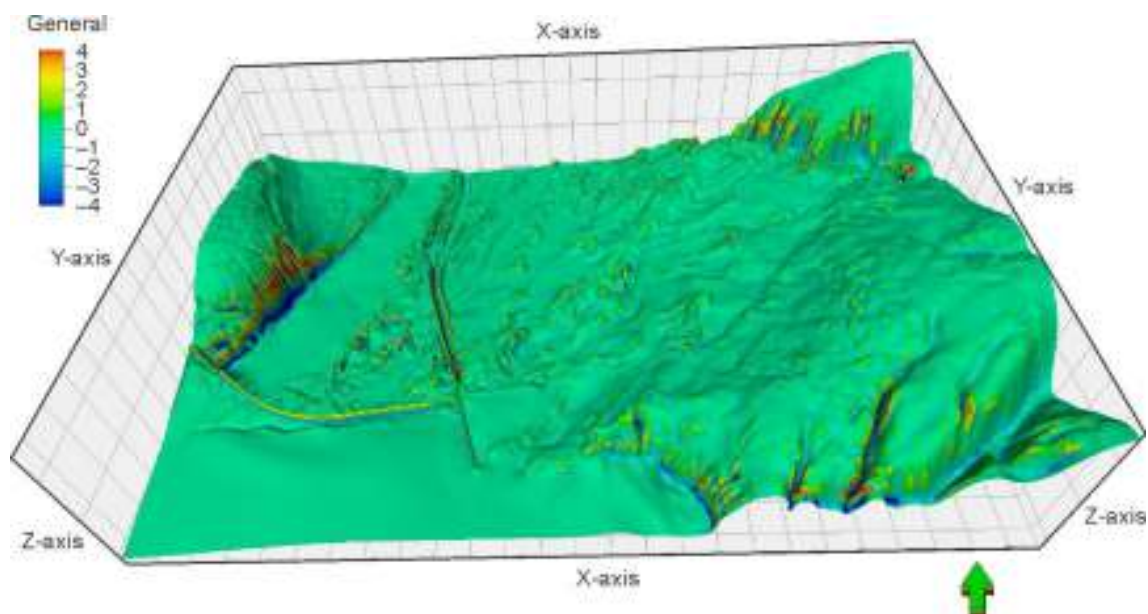


Рисунок 6.14 Карта меры сходства рельефа района Новосибирского Академгородка с шаблоном «бровка террасы».

### 6.3.3 Выделение амплитудных разрывных нарушений

Одна из значимых задач структурной интерпретации сейсмических разрезов и кубов МОГТ – выделение разрывных нарушений. Для нефтегазоносных районов ее решение имеет как научное, так и прикладное значения. Понять, как развивался бассейн, и как в нем происходили процессы миграции флюидов невозможно без выделения сети разрывных нарушений и оценки их проницаемости в различные периоды времени.

Для выделения разрывов по отражающим горизонтам часто строят карты поля модуля градиента или кривизны, на которых разрывы следятся по зонам аномально высоких значений. Такой подход имеет один недостаток – поля производных очень чувствительны к высокочастотным компонентам и случайным погрешностям измерений. На картах градиентов, полученных из реальных сейсмических данных, даже на заметных разрывах значения градиента могут мало отличаться от влияния высокочастотных компонент поля. Если поле сглаживать, или проводить высокочастотную фильтрацию, то это существенно изменяет его вид в области разрывов, которые необходимо обнаруживать. Эффективно данную задачу можно решать с помощью вращающейся палетки типа «уступ».

Рассмотрим возможности применения данного метода на примере интерпретации карт времен, отражающих горизонты Медвежьего месторождения.

Медвежье месторождение расположено на северо-востоке Западной Сибири и приурочено к линейно вытянутому антиклинальному поднятию. Именно с открытием в 1972 году Медвежьего месторождения началась история освоения гигантских газовых ресурсов севера Западной Сибири. Здесь залежи газа, в основном, приурочены к сеноманским пластам, обладающим уникальными фильтрационно-емкостными свойствами. Открытая пористость, определенная в образцах керн, достигает 40%, а среднее значение составляет 28,8% [Тер-Саркисов, 1999].

Изучение строения этого месторождения нами проводилось в связи с построением его геомеханической модели. Предельно высокие значения пористости позволили предположить, что возможный механизм формирования газосодержащих структур гигантских месторождений севера Западной Сибири (Медвежьего, Уренгойского, Ямсовейского, Ямбургского) связан с автокаталитическим всплыванием относительно легких объемов пород. То есть, механизм формирования структуры тесным образом связан с возникновением гигантских газо-насыщенных объемов высокопористых пород, и является своеобразной формой диапиризма [Конторович и др., 2013; 2014]. Этот механизм схож с формированием солевых диапиров. Моделированием процессов соляного диапиризма автор занимался вместе с Б.В. Лунёвым и другими коллегами [Лунёв, Лапковский, 2009; 2010; 2014; 2017; Филиппов и др., 2009]. Показательно то, что дефицит плотности солей и вмещающих пород сопоставим с таким между газо- и водо-насыщенными высокопористыми коллекторами.

В тектоническом отношении месторождение приурочено к южной части Медвежье-Нугинского наклонного мегавала, осложняющий его Медвежий мезовал разделяет Надымскую гемисинеклизу и Большехетскую мегасинеклизу.

Одна из особенностей строения месторождения - увеличение амплитуды положительной структуры вверх по разрезу от фундамента, и юрских отложений до подошвы кузнецовской свиты, которая перекрывает сеноманские терригенные осадки и является региональным флюидоупором.

Медвежье-Нугинский мегавал является линейной структурой первого порядка. Центральная часть поднятия осложнена большим числом амплитудных разрывных нарушений, которые отчетливо проявлены в волновом поле сейсмического куба – Рисунок 6.15.

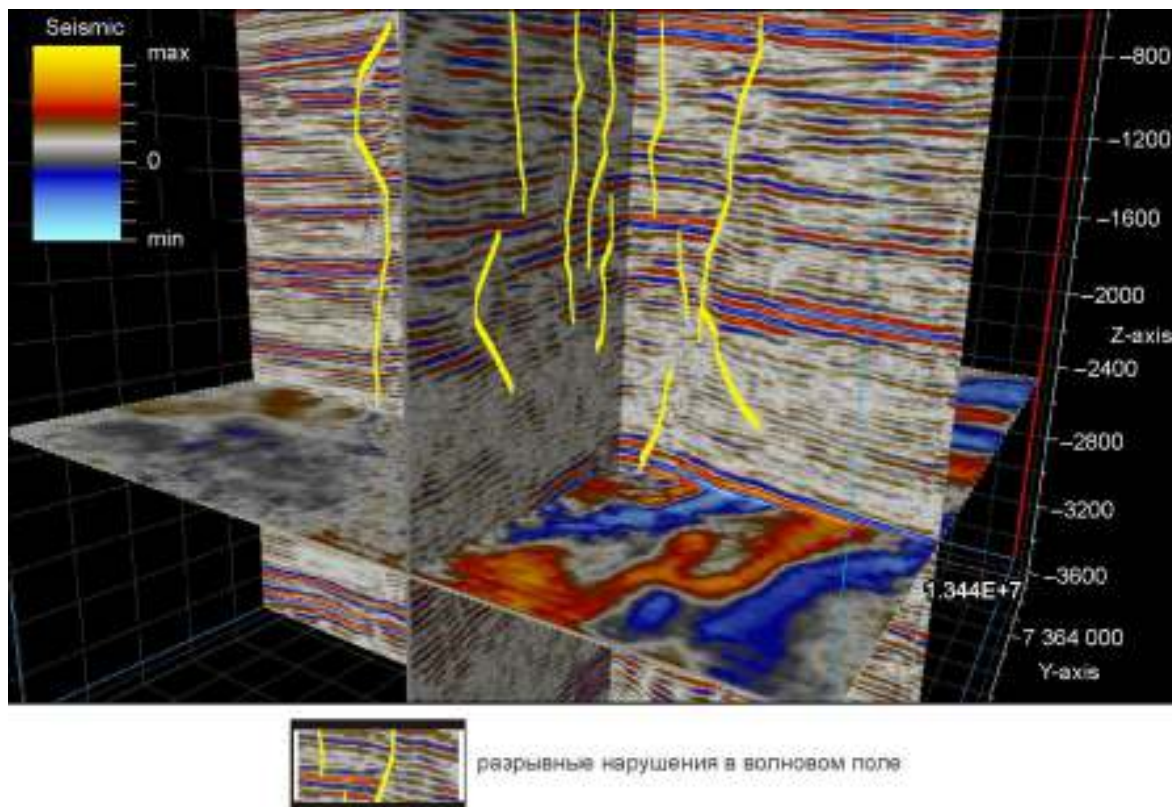


Рисунок 6.15 Сечения временного куба с выделенными линиями разрывных нарушений.

Большое число разрывов отражающих горизонтов в пределах мезокайнозойского осадочного чехла выявляется и при автоматической трассировке фазовых особенностей волнового поля. Здесь жёлтыми линиями показаны наиболее выраженные разрывы, они проявляются в смещении осей синфазности. Амплитуда разрывов достигает 300 мс, что соответствует смещениям в первые сотни метров. Разрывы имеют сложные формы сместителей, иногда они группируются в широкие зоны, которые характеризуются уменьшением амплитуд волнового поля и хаотичностью его рисунка. Такие зоны, возможно, являются газо-проводящими каналами и их можно проследивать от верхнеюрских до сеноманских отложений по характерным особенностям волнового поля.

Карта изохор для отражающего горизонта по кровле баженовской свиты показана на рисунке 6.16. Разрывные нарушения визуально проявляются здесь в виде серий уступов.

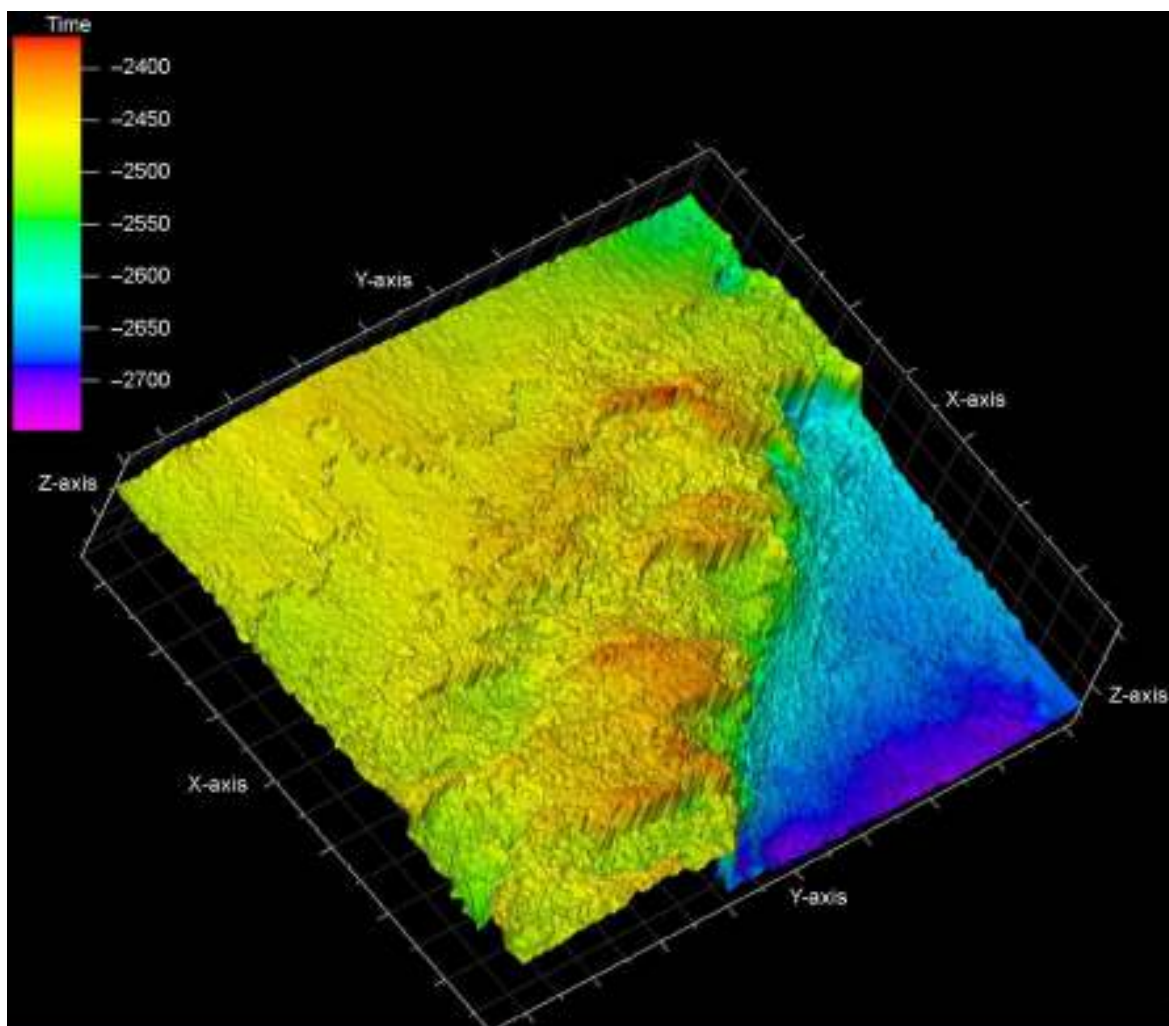


Рисунок 6.16 Карта  $T_0$  по отражающему горизонту Б – кровля баженовской свиты центральной части Медвежьего месторождения.

Для трассировки контуров разрывов по площади месторождения могут использоваться различные карты вычисляемых параметров - углов наклона, модуля градиента, кривизны и др. Области высоких значений этих вычисляемых параметров рассматриваются как индикаторы существования разрывов. Это вполне естественно, но задача осложняется тем, что при создании карт дифференциальных характеристик, случайные погрешности построения модели или высокочастотные компоненты поверхности, вносят в результат заметный уровень шума.

Результат вычисления угла наклона показан на Рисунке 6.17а. На рисунке 6.17б представлен результат вычисления коэффициента локального сходства поверхности с вращающейся палеткой типа уступа.

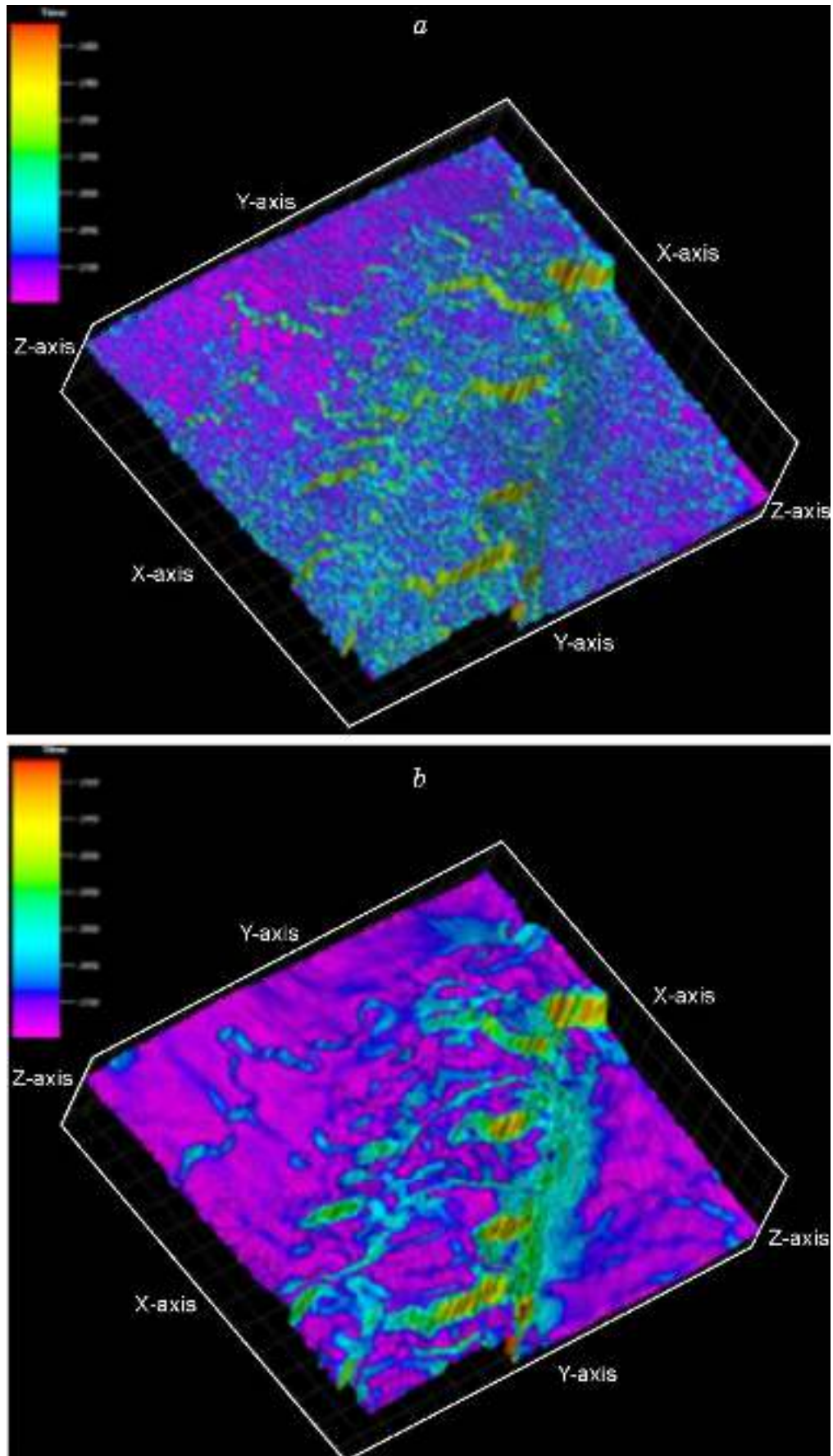


Рисунок 6.17 Критерии выделения разрывов на поверхности отражающего горизонта. а – величина угла наклона поверхности, б – сходство с вращающейся палеткой типа уступ.



Результат, представленный на рисунке 6.16b, лучше соответствует целям обнаружения разрывов поверхности, здесь отсутствуют хаотичные аномально высокие значения, связанные не с реальными видимыми разрывами, а со случайными погрешностями в построении модели.

#### **6.1.4 Выделение малоамплитудных разрывных нарушений**

Малоамплитудным разрывным нарушениям может уделяться существенное внимание при анализе строения геологических объектов и оценке перспектив их нефтегазоносности. С существованием малоамплитудных разрывов могут быть связаны зоны трещиноватости и улучшенных коллекторских свойств. Существует направление в анализе спектрально-частотных характеристик волновых полей, посвященное выявлению таких зон и оценке их коллекторских свойств [Марпл-мл., 1990; Гик, 2012; Гик и др., 2012; Немирович-Данченко, 2013].

Проблема выделения малоамплитудных разломов на основе морфологического анализа отражающих границ является трудной, именно в силу того, что целевые объекты по значению своей амплитуды (перепад глубин или времен отражающих горизонтов) сопоставимы с гладкими вариациями поля и случайными погрешностями измерений.

Задачу, поставленную в данном разделе, проиллюстрируем результатами вычислительного эксперимента. Поверхность, показанная на рисунке 6.18, содержит случайные погрешности и три малоамплитудных разлома.

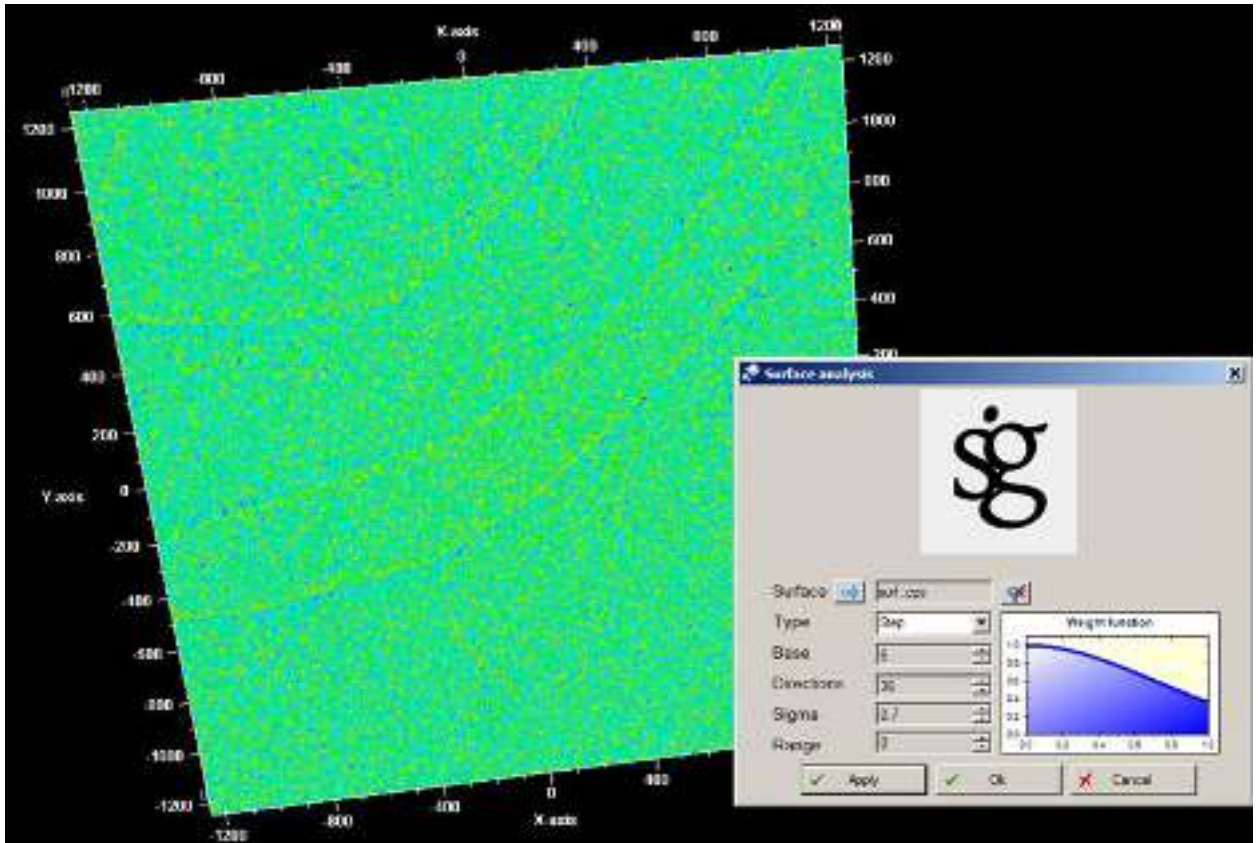


Рисунок 6.18 Модельная поверхность, осложненная малоамплитудными разломами с амплитудой вертикального перемещения близким к случайным погрешностям.

После вычисления индикаторной функции близости фрагментов поверхности с уступами – рисунок 6.19, яркими оранжевыми линиями удалось выявить положение её слабо различимых разрывов.

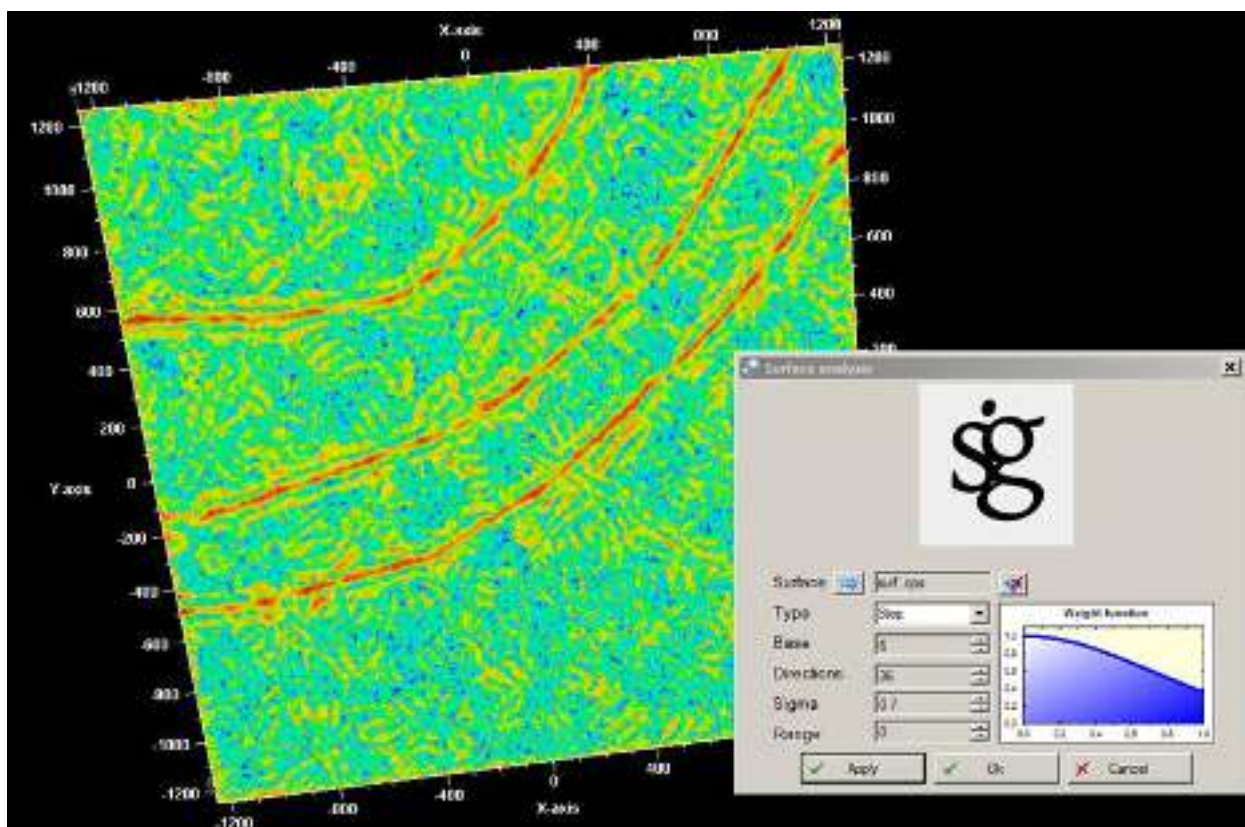


Рисунок 6.19 Карта индикатора локального сходства поверхности рисунка 6.18. с вращающимися палетками типа «уступ».

Возвращаясь в целом к проблематике изучения форм геологических поверхностей с помощью палеток, представляется обоснованным следующий вывод: этот метод позволяет обнаруживать те детали и особенности строения, которые слабо различимы на гипсометрических моделях поверхностей. В качестве последней иллюстрации приведен пример, связанный с изучением одного из месторождений севера Сибири. На Рисунке 6.20а показан один из рабочих вариантов структурной карты отражающего горизонта. Числовая модель этой поверхности получена по сейсмическим данным с использованием средств интерпретационного пакета *W-seis*. Месторождение имеет достаточно сложное строение, и в сводовой части оно осложнено большим числом амплитудных разрывов. Структурная карта позволяет увидеть эти нарушения. Обработка числовой модели с помощью палеток, а именно с использованием центрально симметричной палетки, позволяет «проявить» в структурной карте детали, неразличимые на Рисунке 6.20а – это хорошо заметные линейные и сетчатые аномалии, видимые на Рисунке 6.20б.

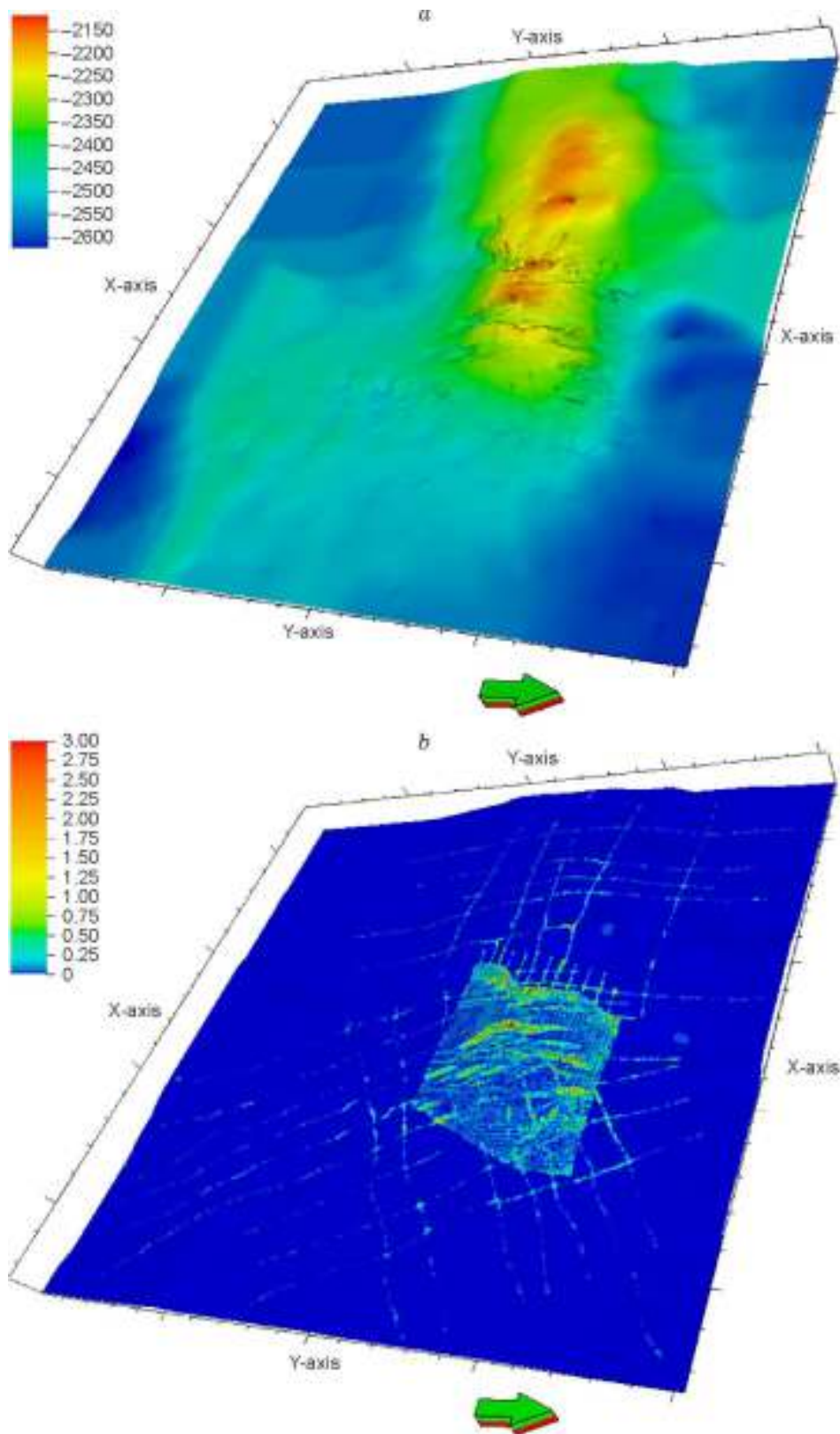


Рисунок 6.20 Обработка поверхности с палеткой центрально симметричной формы, позволяющая «высветить» исходную систему наблюдений: а – структурная карта по отражающему горизонту, б – вычисленная мера схождения.

Эти аномалии связаны со структурой исходных данных. Не трудно увидеть, что структурная карта, была создана по сети 2D профилей, а также одного

сейсмического куба. Результат, показанный на рисунке 6.20b, показывает и группу заметных аномалий, явно несвязанных с расположением исходных данных. Очевидно, что эти аномалии не могут являться артефактами, они обусловлены системой разломов в сводовой части поднятия.

#### **Выводы:**

1. Предложена технология вычисления дифференциальных характеристик по моделям поверхностей геологических тел, учитывающая заданные разрывные нарушения, и ориентированная на обнаружение тех аномалий, которые не локализованы в разрывах.
2. На основе нахождения наилучшего (в определенном смысле **оптимального**) совпадения фрагментов геологических поверхностей и вращающихся типовых шаблонных форм разработана и программно-реализована технология вычисления похожести на следующие морфологические формы: уступ, тальвег, ребро, бровка террасы, тыловой шов террасы. Эта технология опробована на структурных поверхностях некоторых месторождений Западной Сибири.

## ГЛАВА 7 ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ЮРСКО-МЕЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

*Самое лучшее из всех доказательств — есть опыт.*

*Роджер Бэкон*

В настоящей главе, на примере комплексного анализа геолого-геофизических материалов по участку Геофизического месторождения Гыданского НГР, показываются принципиальные возможности построения сложных сейсмогеологических и структурных моделей с использованием оптимизационных методов. Вряд ли возможно ожидать, что на одном, даже достаточно крупном объекте, могут быть проверены и оценены все возможности методик, разрабатываемые автором на протяжении более чем 20-ти лет. Но результаты, представленные ниже, показывают их эффективность и некоторые содержательные достижения, полученные благодаря их использованию.

### **7.1 Краткая геолого-геофизическая характеристика объекта моделирования**

На Геофизическом поднятии поисковое бурение было начато в 1975 году, и в этом же году, 41-й скважиной открыто крупное нефтегазоконденсатное месторождение. Месторождение расположено на западном побережье полуострова Гыдан в ЯНАО. На нем выявлено 35 газовых, газоконденсатных, нефтяных и нефтегазоконденсатных залежей. Доказанные запасы Геофизического месторождения на конец 2012 г включали 124,9 млрд м<sup>3</sup> газа и 0,4 млн т жидких углеводородов [[Месторождения](#), 2014]. Эти запасы составляют значительную долю углеводородного сырья в общих ресурсах Гыданского НГР [Мырзак, 2013], в частности здесь сосредоточено более половины запасов нефти района.

В стратиграфическом отношении, нефтегазоносность месторождения охватывает юрско-меловой диапазон от готтерива до турона. Месторождение характеризует многоярусное строение, в своей сводовой части оно имеет большое

число разрывных нарушений, что осложняет построение структурных моделей. Другая трудность в изучении данного объекта, связана с невыдержанностью, выклиниванием и литологическим замещением пластов. Особенно это характерно для апт-альб-сеноманского осадочного комплекса, в значительной части сложенного прибрежно-морскими, русловыми и дельтовыми отложениями.

### **7.1.1 Сейсмогеологические мегакомплексы мезозойско-кайнозойского осадочного чехла**

На Гыданском полуострове, как и в Западной Сибири в целом, выделяют три нефтегазоносных мегакомплекса: триас-юрский, берриас-нижнеаптский (неокомский) и апт-альб-сеноманский. Терригенные отложения этих мегакомплексов перекрыты выдержанными глинистыми пачками, которые являются основными флюидоупорами и регионально контролируют нефтегазоносность [Казаринов, 1958; 1963; Гурари и др., 1968; Карогодин, 1974; Геология нефти и газа, 1975].

Предположительно, отложения триаса на территории полуострова Гыдан представлены терригенно-вулканогенными породами тампейской серии. Эта толща изучена скважинами в Усть-Енисейском районе, а также в соседней Уренгойской фациальной зоне, где в СГС-6 (сверхглубокая скважина) её отложения залегают на глубинах 6419-5655 метров [Скоробогатов, Строганов, 2006].

В северных и арктических регионах Западной Сибири установлены регионально устойчивые сейсмические горизонты (Ia, Ib), которые отождествляются с отложениями тампейской серии [Государственная..., 2004]. Отражающий горизонт Ia относится к кровле тампейской серии, Ib – кровле вулканогенных образований нижнего триаса, а отражающий горизонт A – подошве нерасчлененных вулканогенных отложений пермско (?) - нижнетриасового возраста.

Триас-юрский мегакомплекс перекрывается глинистыми осадками баженовской свиты и её стратиграфическими аналогами, к которым в пределах Ямало-Гыданской фациальной области относится гольчихинская свита.

Отложения юрской системы на Гыданском полуострове представлены зимней, левинской, шараповской, китербютской, надояхской, лайдинской, вымской, леонтьевской, малышевской, точинской свитами [Стратиграфия, 2000]. Это преимущественно морские и мелководно-морские терригенные отложения. Их общая мощность составляет более 2000 м. Состав пород достаточно разнообразный от кварцевых галечников, до битуминозных аргиллитов.

Берриас-нижнеаптский (неокомский) мегакомплекс сложен терригенными породами ахской и танопчинской свит. В фациальном отношении это преимущественно континентальные толщи, особенно в верхней части разреза, где встречается многочисленный детрит, прослой углей и русловые отложения. В кровле апт-альб-сеноманского комплекса залегают глины кузнецовской свиты.

Региональные флюидоупоры представлены выдержанными трансгрессивными глинистыми толщами, сформировавшимися в эпохи тектонического покоя. Эти флюидоупоры выделяются низкой акустической жесткостью, на их границах возникают значительные по абсолютной величине коэффициенты отражения, и за счет этого они опознаются на сейсмических разрезах как выдержанные амплитудные реперы - рисунок 7.1.

Для Геофизического месторождения выделено пять региональных сейсмогеологических мегакомплексов: тоар-волжский, берриас-нижнеаптский (неокомский), апт-альбский, сеноманский, турон-сантонский и компан-кайнозойский. Внутри которых выделены и протрассированы отражающие горизонты, позволяющие более детально проанализировать их внутреннюю структуру. Характерные временные сейсмогеологические разрезы представлены на рисунках 7.1-7.3.



С

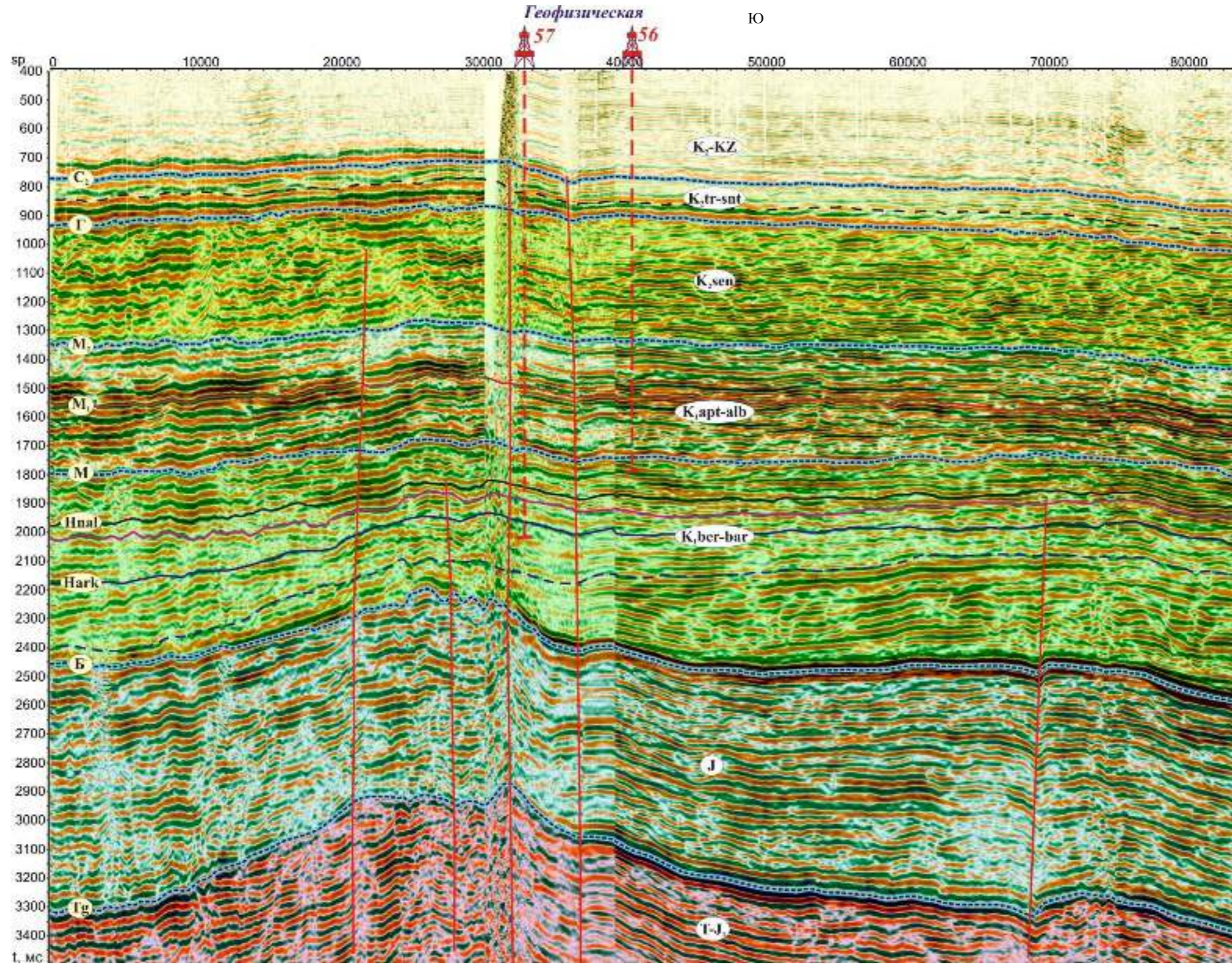


Рисунок 7.1 Временной сейсмогеологический разрез по композитному профилю 19334+cr17+57190.

3

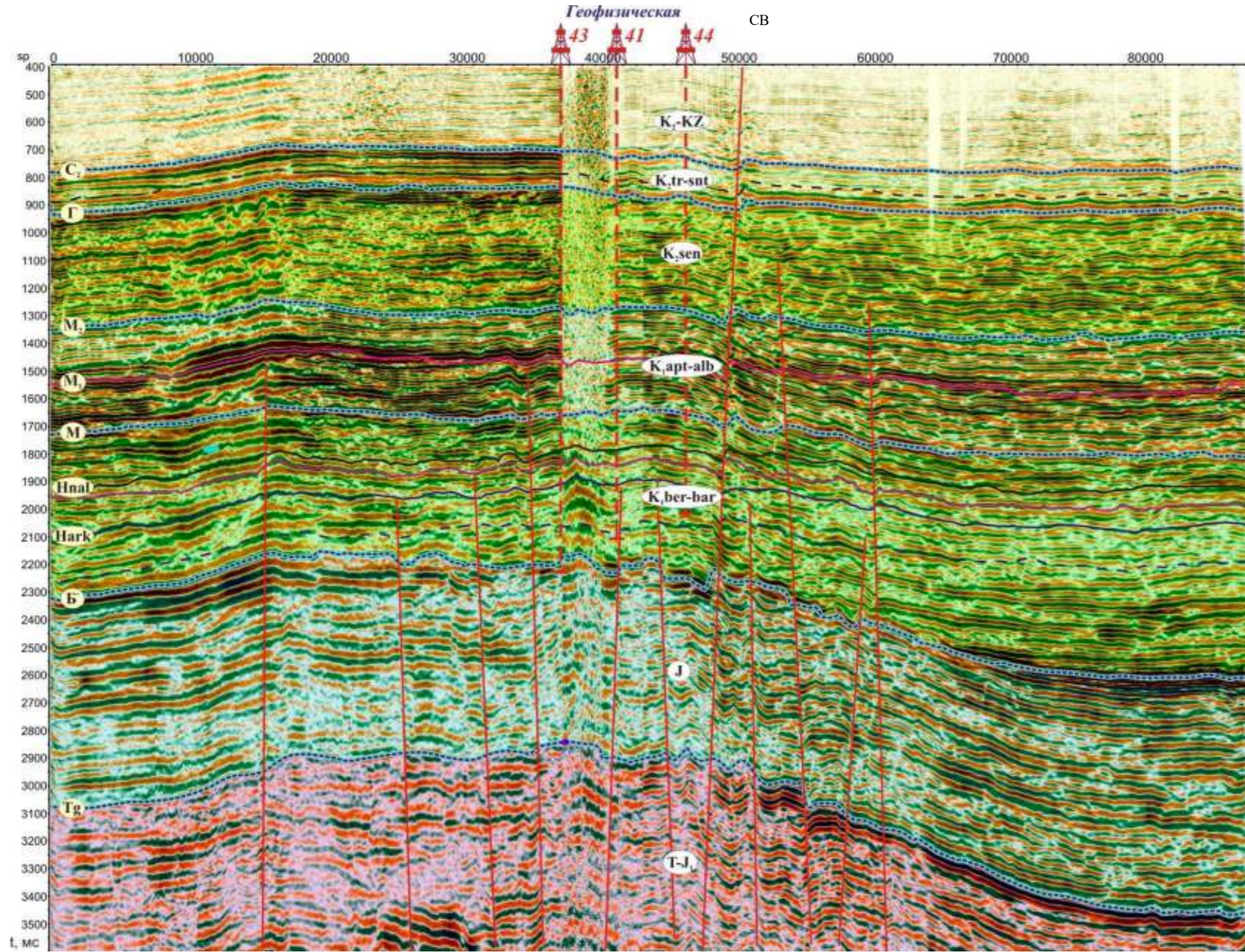


Рисунок 7.2 Временной сейсмогеологический разрез по композитному профилю 30060+cr27+in50+44423.

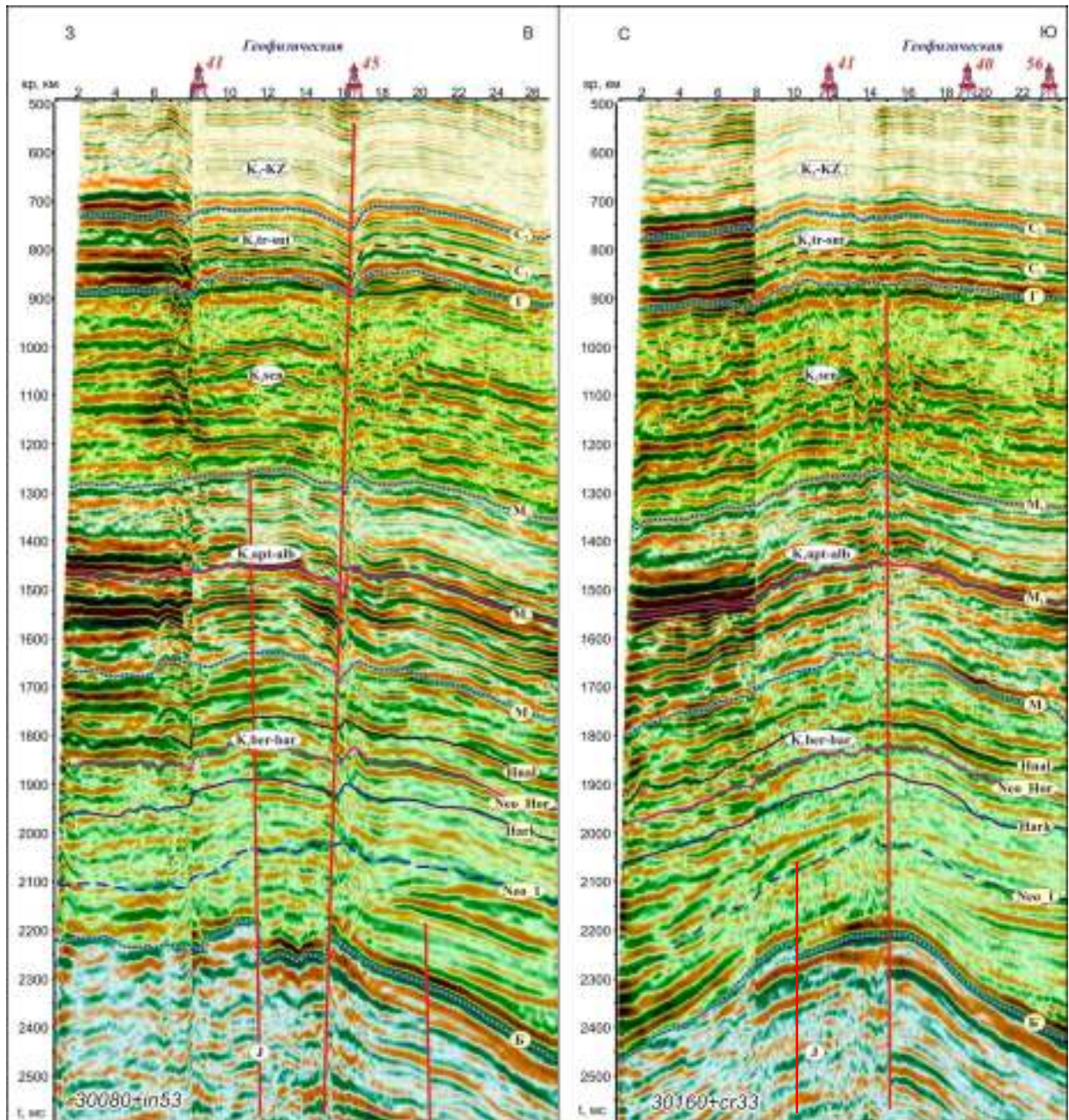


Рисунок 7.3 Временные сейсмогеологические разрезы по композитным профилям № 30080+in53 и № 30160+cr33.

Одномерное сейсмоакустическое моделирование выполнялось И.А. Губиным. В результате этих исследований удалось стратифицировать основные отражающие горизонты – табл. 7.1.

Таблица 7.1. Стратификация отражающих горизонтов по результатам одномерного сейсмоакустического моделирования по скважинам Геофизическая-41, 45, 51, 55, 59

Индекс отражающего горизонта	Стратиграфическая приуроченность
C <sub>2</sub>	Верхний мел. Кровля нижнеберезовской подсвиты
C <sub>1</sub>	Верхний мел. Кровля кузнецовской свиты
Г	Верхний мел. Кровля марресалинской свиты
M <sub>2</sub>	Нижний мел. Кровля яронгской свиты
M <sub>1</sub>	Нижний мел. Вблизи кровли танопчинской свиты, между УП <sub>2</sub> и УП <sub>3</sub>
M	Нижний мел. Внутри танопчинской свиты, между УП <sub>5</sub> и ТП <sub>16</sub> . Вблизи кровли нейтинской пачки.
Hnal	Нижний мел. Внутри танопчинской свиты, кровля ТП <sub>20</sub> (подошва нижнеалымской пачки)
Neo_Hor	Нижний мел. Внутри танопчинской свиты, кровля ТП <sub>24</sub>
Hark	Нижний мел. Кровля ахской свиты (кровля арктической пачки)
Neo_1	Нижний мел. Внутри ахской свиты, кровля БГ <sub>18</sub>
Б	Верхняя юра, кровля гольчихинской свиты
Tg	Нижняя юра. Условно кровля китербютской свиты

## 7.2 Принципы выделения и трассирования разрывных нарушений, методика построения карт изохрон и структурных карт

Для построения всех структурных карт применялась однотипная методика, адаптированная для условий Геофизического месторождения. Она включает последовательное выполнение следующих видов работ:

- 1 Трассировка отражающих горизонтов.
- 2 Выделение на разрезах линий разрывных нарушений.

3 Выгрузка координат сейсмических трасс и  $t_0$  отражающих горизонтов с их взаимной корректировкой путем минимизации суммы квадратов невязок в точках пересечения профилей по методике, описанной в разделе 5.2.1.

4 Выгрузка координат и значений  $t_0$  точек пересечения разрывов и всех отражающих горизонтов.

5 Построение карт  $t_0$  в пликативном варианте без сглаживания.

6 Вычисление чувствительных по отношению к влиянию разрывов атрибутов – меры похожести на уступы и меры похожести на центрально симметричные формы.

7 Фильтрация данных  $t_0$  вблизи линий разрывов.

8 Фильтрация данных  $t_0$  по ячейкам регулярной сети для подавления необоснованных высокочастотных компонент в соответствии с методом раздела 5.2.1.

9 Трассировка линий разрывов для каждого из горизонтов по площади.

10 Построение карт  $t_0$  путем двухкомпонентной аппроксимации с использованием многомерных натуральных сплайн-функций с учетом положения линий разрывов, в соответствии с методикой, описанной в разделе 5.3.

11 Построение структурных карт с использованием регрессионных зависимостей время-глубина на основе карт  $t_0$  и данных о глубинах отражающих горизонтов в скважинах, в соответствии с методикой, описанной в разделе 5.5.

**Трассировка отражающих горизонтов.** Этот процесс был выполнен с использованием инструментов автоматического, полуавтоматического и ручного прослеживания особенностей волнового поля средствами интерпретационного пакета *W-seis* [Конторович, Лапковский, 2008]. Положение горизонтов контролировалось в точках пересечения отдельных разрезов, а также ин-лайн и кросс-лайн сейсмического куба.

**Выделение на разрезах линий разрывных нарушений.** При выделении разрывных нарушений использовались классические сейсмостратиграфические критерии. Разрывы опознавались по особенностям волнового поля: смещение осей синфазности, ступенеобразное изменение положения отражающих

горизонтов, появление хаотичных отражений в субвертикальных зонах, заметное уменьшение средней амплитуды сейсмической записи и т.д. Примеры выделенных на разрезах разрывных нарушений представлены на рисунках 7.4, 7.5.

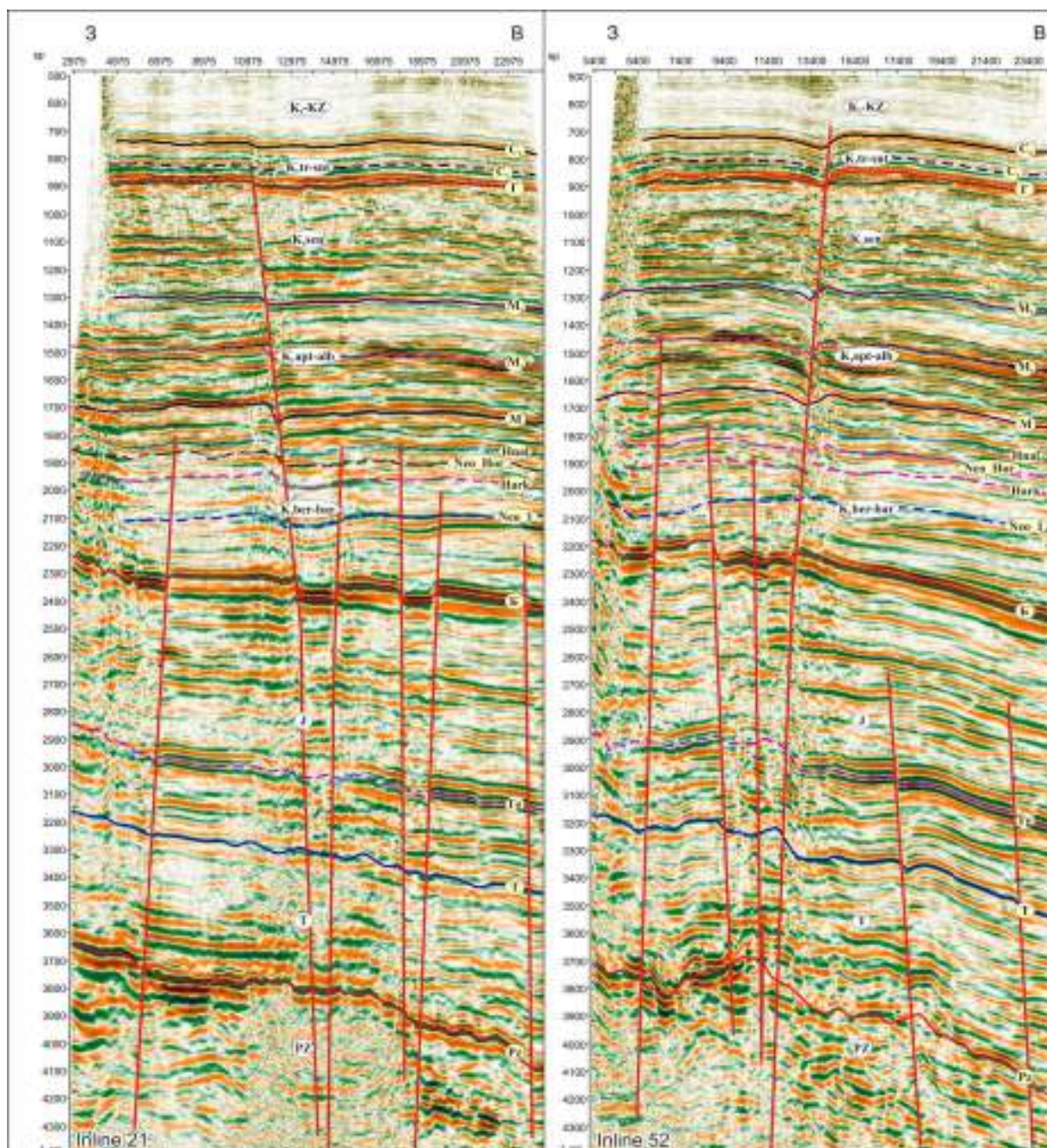


Рисунок 7.4 Разрывные нарушения на временных сейсмических разрезах по профилям Inline 21 и Inline 52.

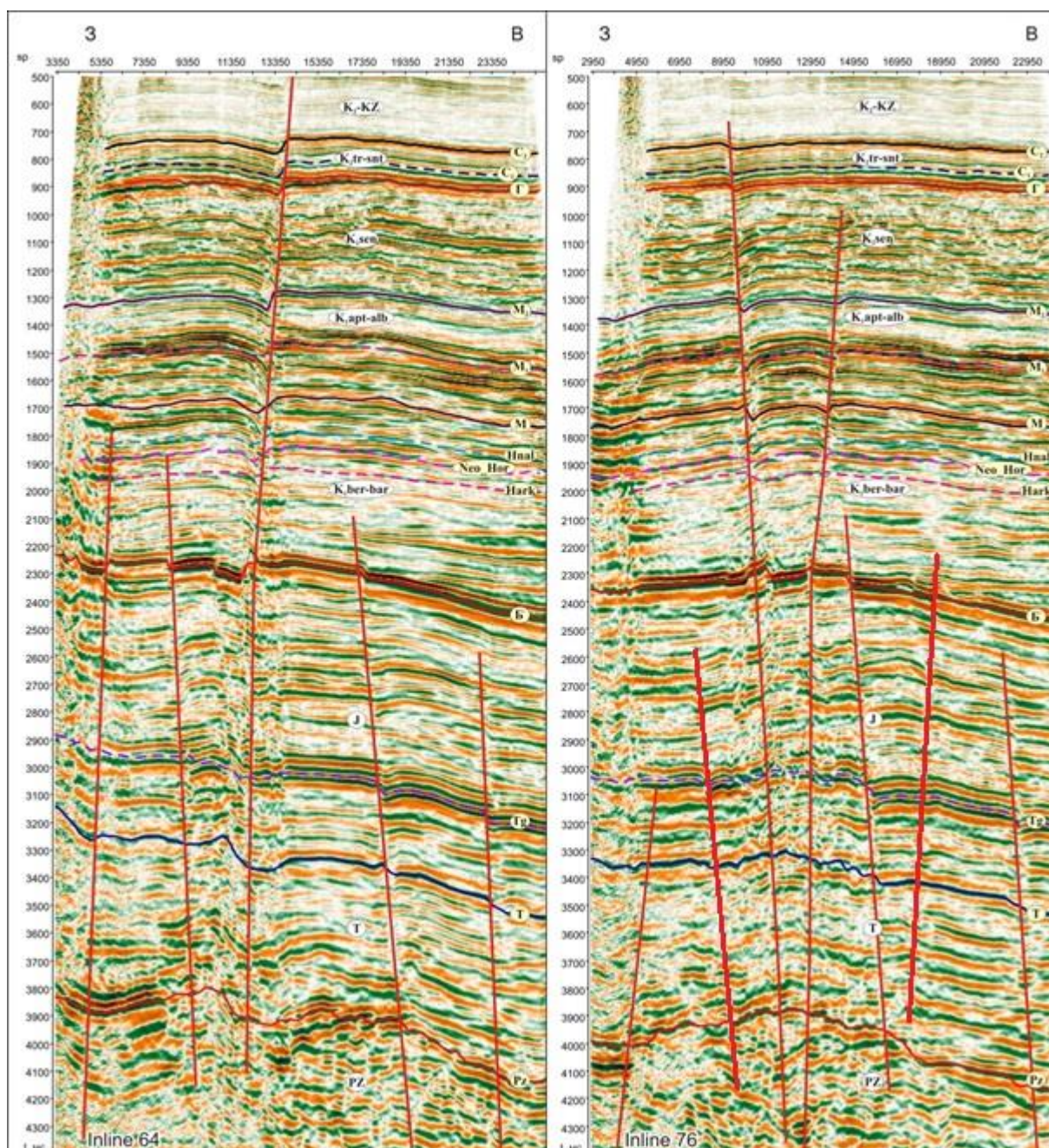


Рисунок 7.5 Разрывные нарушения на временных сейсмических разрезах по профилям Inline 64 и Inline 76.

**Выгрузка координат сейсмических трасс и  $t_0$  отражающих горизонтов с их взаимной корректировкой.** Корректировка данных оказалась необходимой из-за несоответствия волновых полей системы 2D профилей и сейсмического куба – Рисунок 6.6. Взаимная увязка путем минимизации суммы квадратов отклонений горизонта в точках пересечения профилей выполнялась в соответствии с постановкой [Муклыгин, Лапковский, 1985] путем сдвига значений  $t_0$  на разрезах.

Технология вычисления поправок для уменьшения уровня невязок подробно описана в разделе 5.2.1 настоящей работы.

В представленном на рисунке 7.6 примере уровень невязки между 2D и 3D данными составляет около 10 мс.

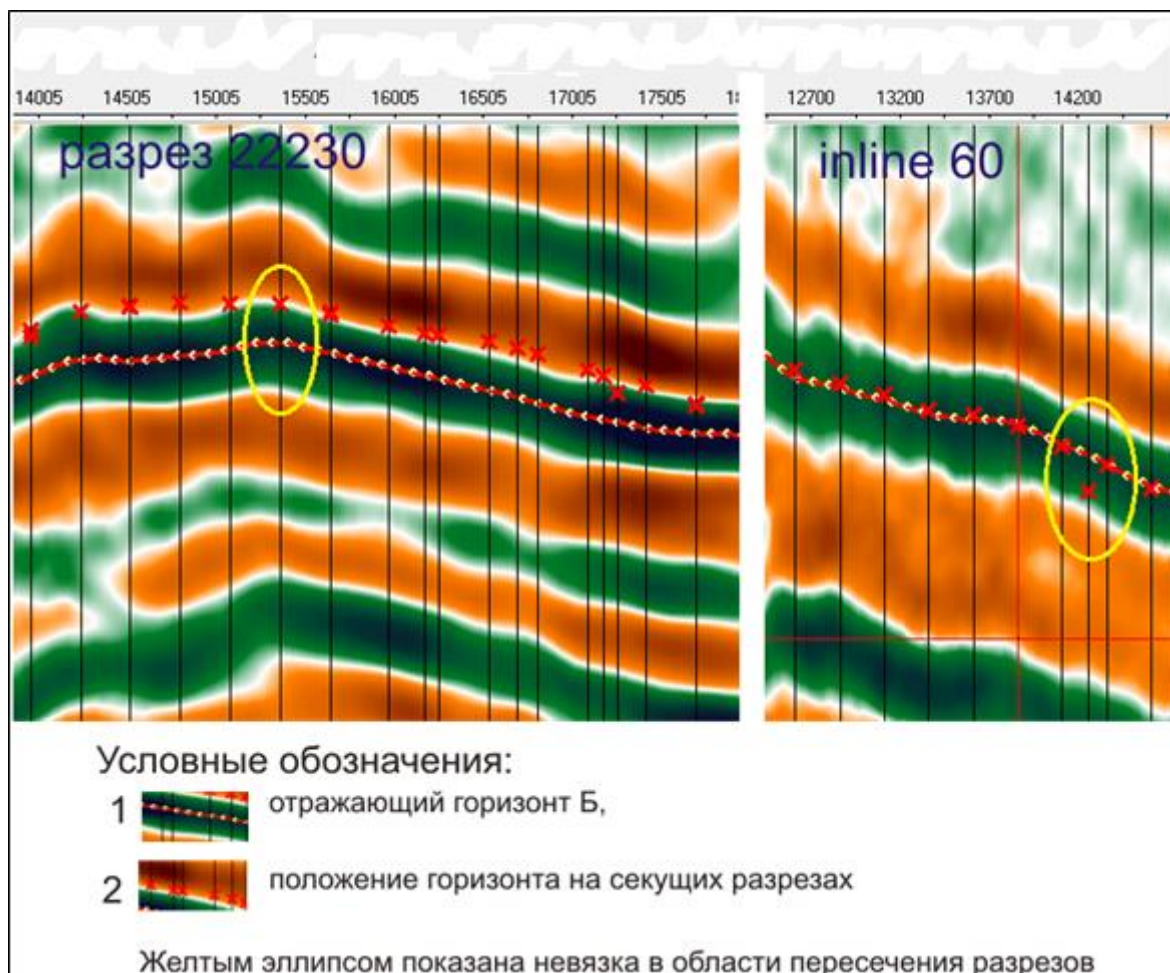


Рисунок 7.6 Невязки отражающего горизонта на пересечениях разрезов 2D и 3D съемок до их минимизации.

На Рисунке 7.7 также показаны невязки между значениями времен отражающего горизонта Б в системе 2D профилей и сейсмического куба. Цвет закраски линий разрезов и куба определяется значением  $t_0$  отражающего горизонта Б. При прохождении профилей по области 3D съемки видно, что тон закраски профиля заметно и закономерно отличается от фоновой окраски, что свидетельствует о существовании значимых и систематических расхождениях в положении отражающих горизонтов. Максимальный уровень сдвига значений  $t_0$



горизонта Б составил 30 миллисекунд, среднеквадратический уровень поправок составил 3.7, а средняя поправка, внесенная в данные, составила -0.19 миллисекунды.

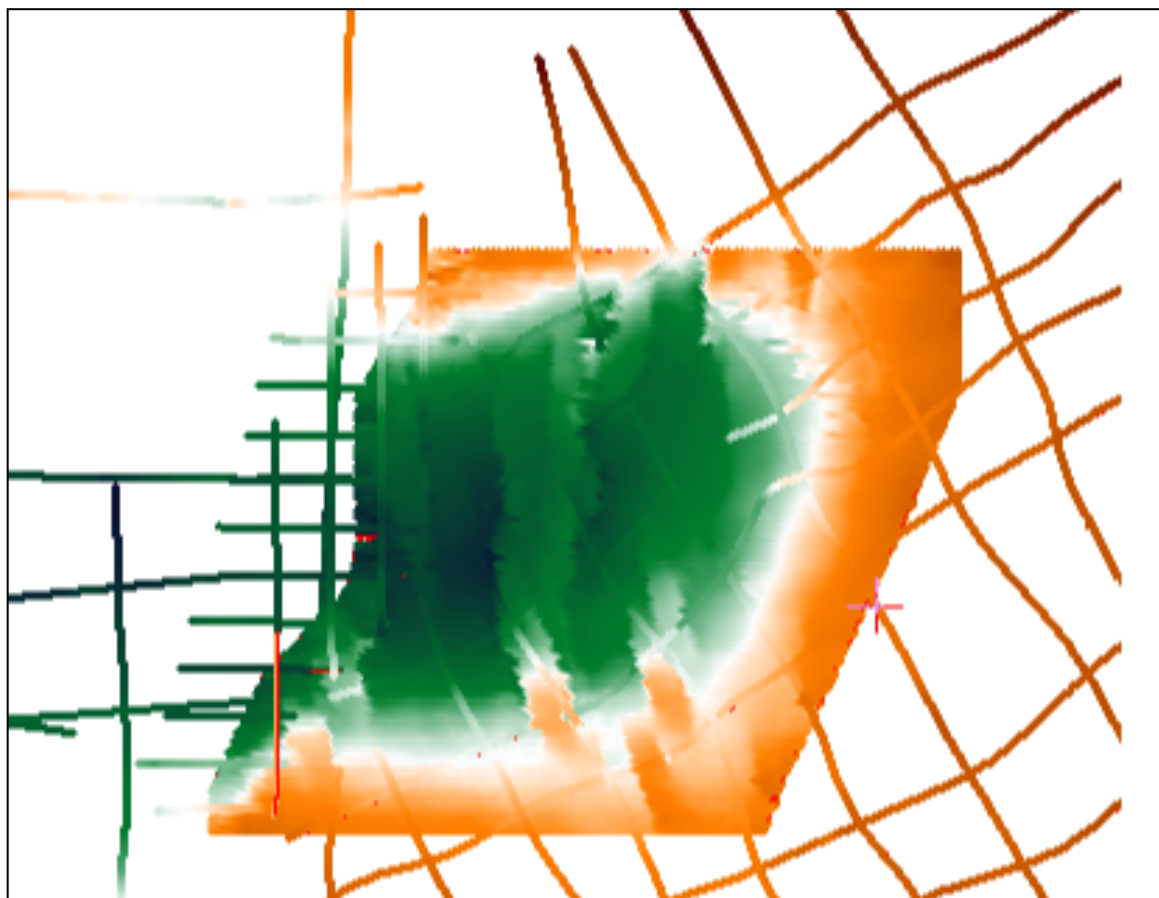


Рисунок 7.7 Проявление невязок отражающего горизонта на интерпретационном планшете.

**Выгрузка координат и значений  $t_0$  точек пересечения разрывов и отражающих горизонтов.** В данном процессе для каждого отражающего горизонта получаем набор точек, которые маркируют систему разрывных нарушений на планшете построения карт. Для наклонных разрывов маркирующие точки каждого из горизонтов смещаются.

**Построение карты  $t_0$  в пликативном варианте без сглаживания.** Построение карты, или если говорить точнее, создание регулярных сеточных моделей по набору хаотически расположенных данных, позволяет выявить общие черты морфологии отражающих горизонтов и учитывать их при трассировке на

планшете линий разрывных нарушений. Для выполнения этой задачи использовалась двухкомпонентная технология создания карт, описанная в разделе 5.3.1. настоящей работы. В качестве базовой компоненты выбран натуральный интерполирующий сплайн, выраженный через соответствующую функцию Грина. Также использовалась альтернативная технология получения карт  $t_0$ , но полученные результаты практически оказались неразличимыми. Суть этой технологии состояла в раздельном построении двух карт по набору 2D и 3D данных, с последующей вклейкой карты 3D в контур данных, принадлежащих сейсмическому кубу. Процедура вклейки реализована средствами программы *GridMaster* [Лапковский, Конторович, 2014]. Карты изохрон намеренно строилась без сглаживания, чтобы сохранялись все уступчатые формы, обусловленные наличием разрывных нарушений. Исходная карта изохрон для отражающего горизонта Б показана на рисунке 7.8.

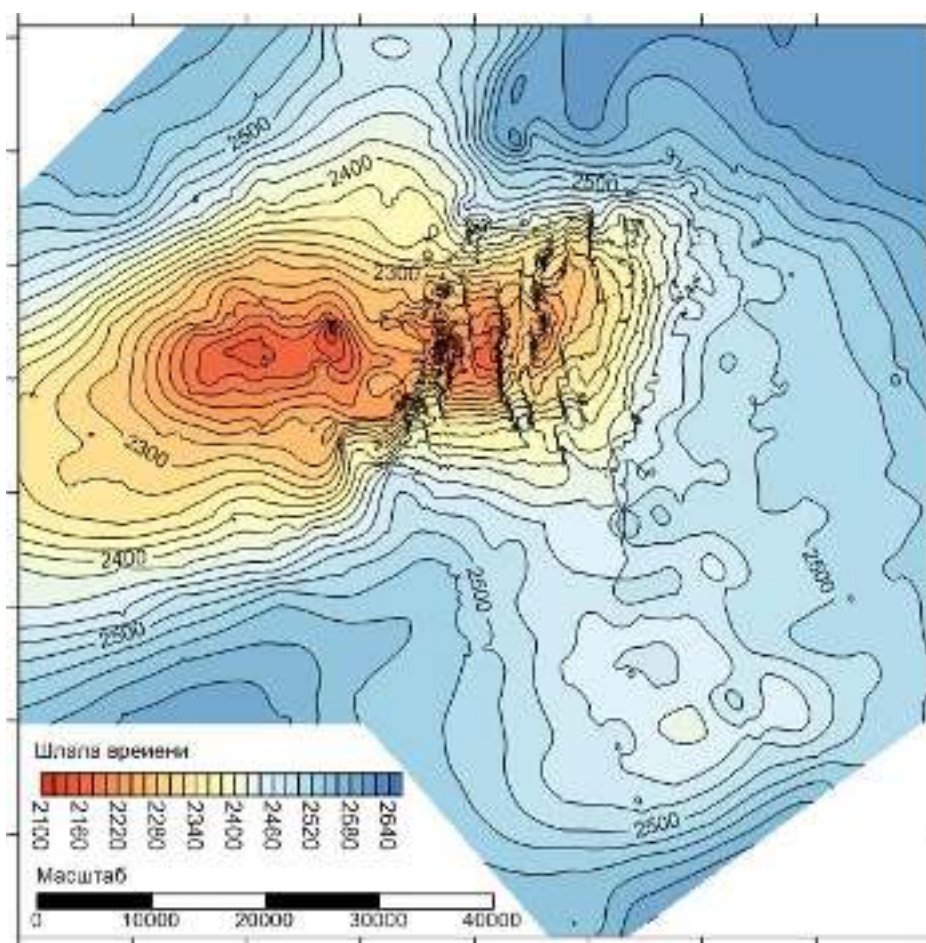


Рисунок 7.8 Пликативные вариант карты  $t_0$  горизонта Б (без сглаживания).

**Вычисление чувствительных по отношению к влиянию разрывов атрибутов карт изохрон.** Обычно в качестве таких атрибутов используются карты модуля градиента или значения средней кривизны поверхности. Автором была разработана методика вычисления локальной схожести рельефа поверхности на шаблонные формы. В данной работе сама методика подробно описана в разделе 6.3. С её помощью для карт изохор отражающих горизонтов Геофизического месторождения, были рассчитаны коэффициенты их локальной схожести с формами типа «уступ», с центрально симметричными и линейными формами.

Одна из полученных карт меры сходства приведена на рисунке 7.9.

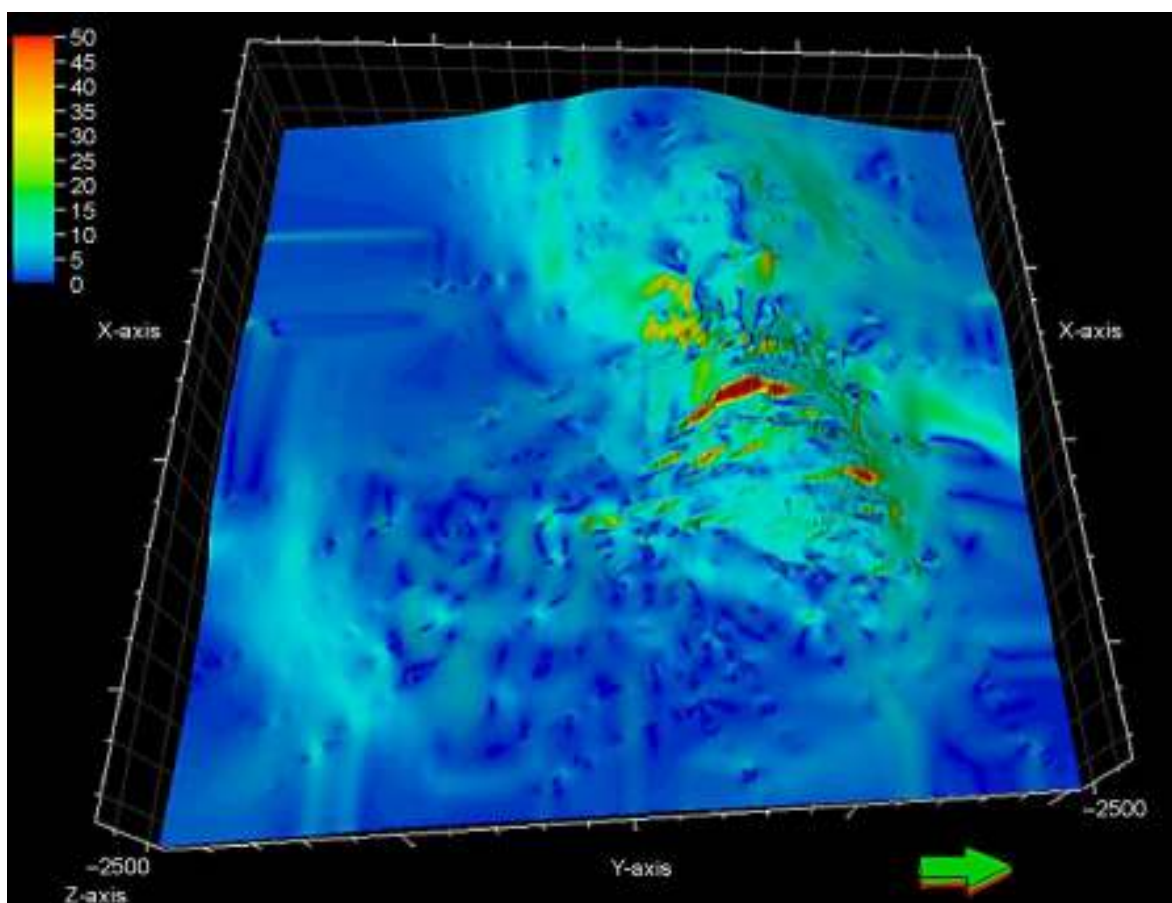


Рисунок 7.9 Карта меры схожести форм поверхности горизонта Б на уступы.

Области красных и оранжевых тонов соответствуют высокой степени схожести рельефа с уступами. Собственно, трассировка разрывов выполнялась на планшете, с подложкой в виде карты, представленной на рисунке 7.9 и вынесенными точечными маркерами положения разрывов на отдельных разрезах. Один из вариантов положения разрывов горизонта Б показан на рисунке 7.10.

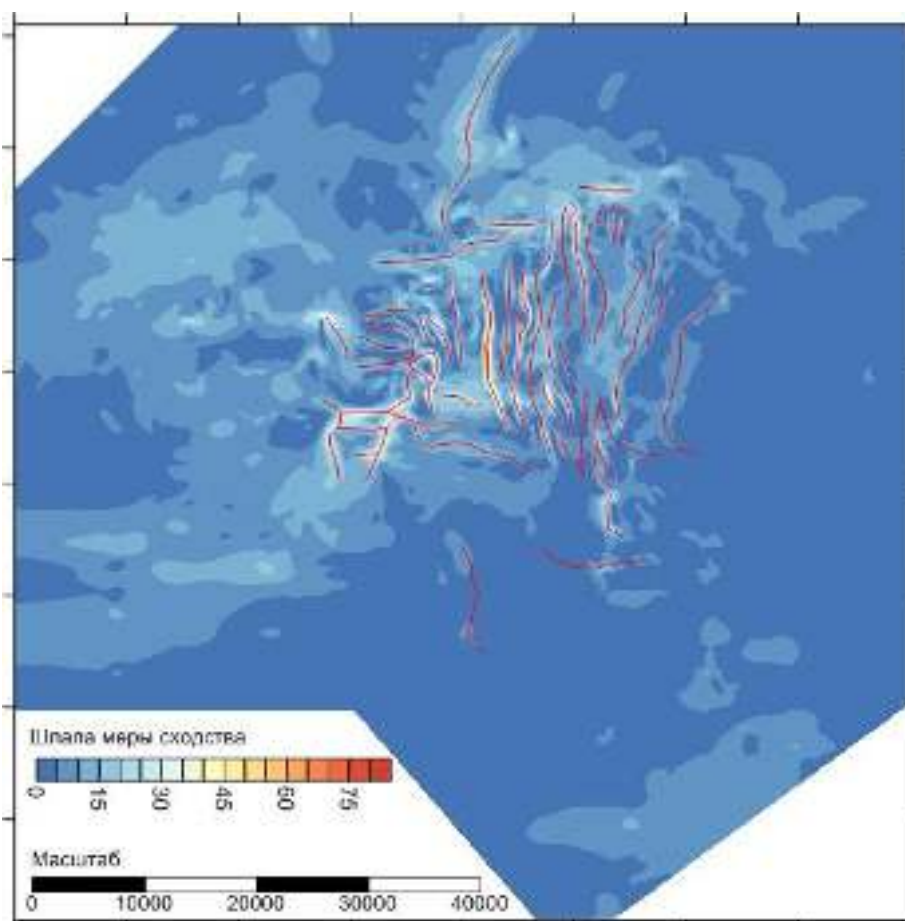


Рисунок 7.10 Линии разрывов, выделенные по полю индикаторного признака.

**Фильтрация данных по  $t_0$  вблизи линий разрывов.** В тектонически нарушенных зонах волновое поле имеет неустойчивый характер, а трассировка отражающих горизонтов в любом из режимов оказывается малообоснованной. Ряд интерпретационных пакетов предлагает критерий когерентности волнового поля для автоматической оценки возможности прослеживания его фазовых особенностей.

Протяженность зон разрывных нарушений на Геофизическом месторождении достигает нескольких сотен метров, в этих условиях невозможно строго рассортировать точки горизонта, находящиеся по разные стороны от разрыва. Некорректное разнесение точек приводит к существенным ошибкам при интерполяции с учетом разрывов. Чтобы не допускать таких ситуаций, оправдано удалить точки из исходных данных наблюдений, находящиеся достаточно близко к заданным линиям разрывов. Этими соображениями обосновано использование фильтрации данных при создании модели месторождения.

**Фильтрация данных по  $t_0$  по ячейкам регулярной сети для подавления случайных и высокочастотных компонент поля (редискретизация данных).**

Содержание данной процедуры рассмотрено в разделе 5.2.1 настоящей работы. Её использование при построении карт приводит к уменьшению объема данных, к их большей регулярности и уменьшению влияния случайных и высокочастотных изменений картируемого признака.

**Построение карт  $t_0$  путем двухкомпонентной аппроксимации.**

Методика построения карт, осложненных разрывами, опубликована в работе [Лапковский, 2004], в диссертационной работе она представлена в разделе 5.3.1. Она реализована в интерпретационном пакете *W-seis*, и с её использованием были построены все дизъюнктивные варианты карт изохор для основных отражающих горизонтов. Некоторые из результирующих вариантов карт изохрон представлены на рисунке 7.11-7.13.

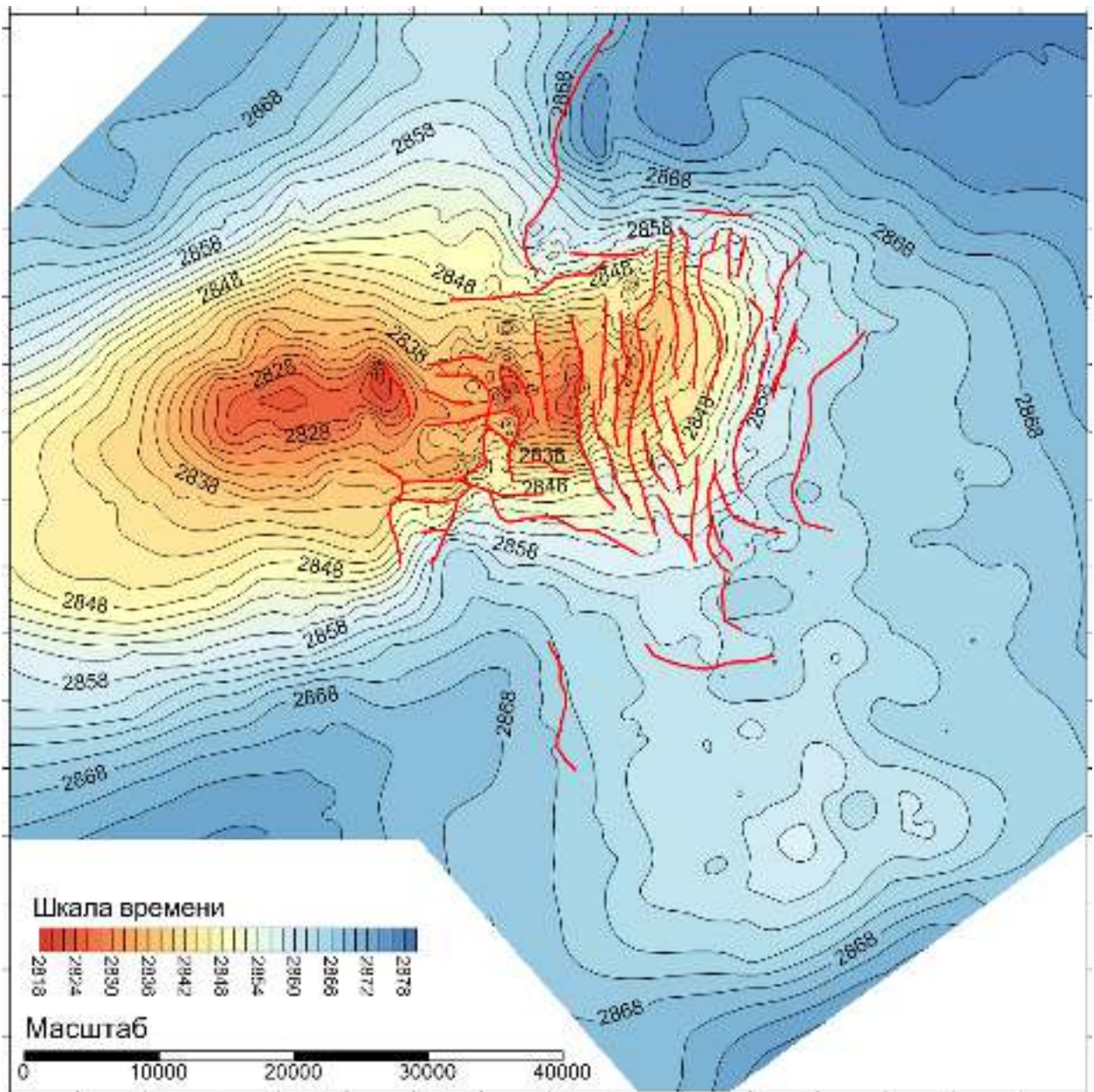


Рисунок 7.11 Карта изохор по отражающему горизонту Б.

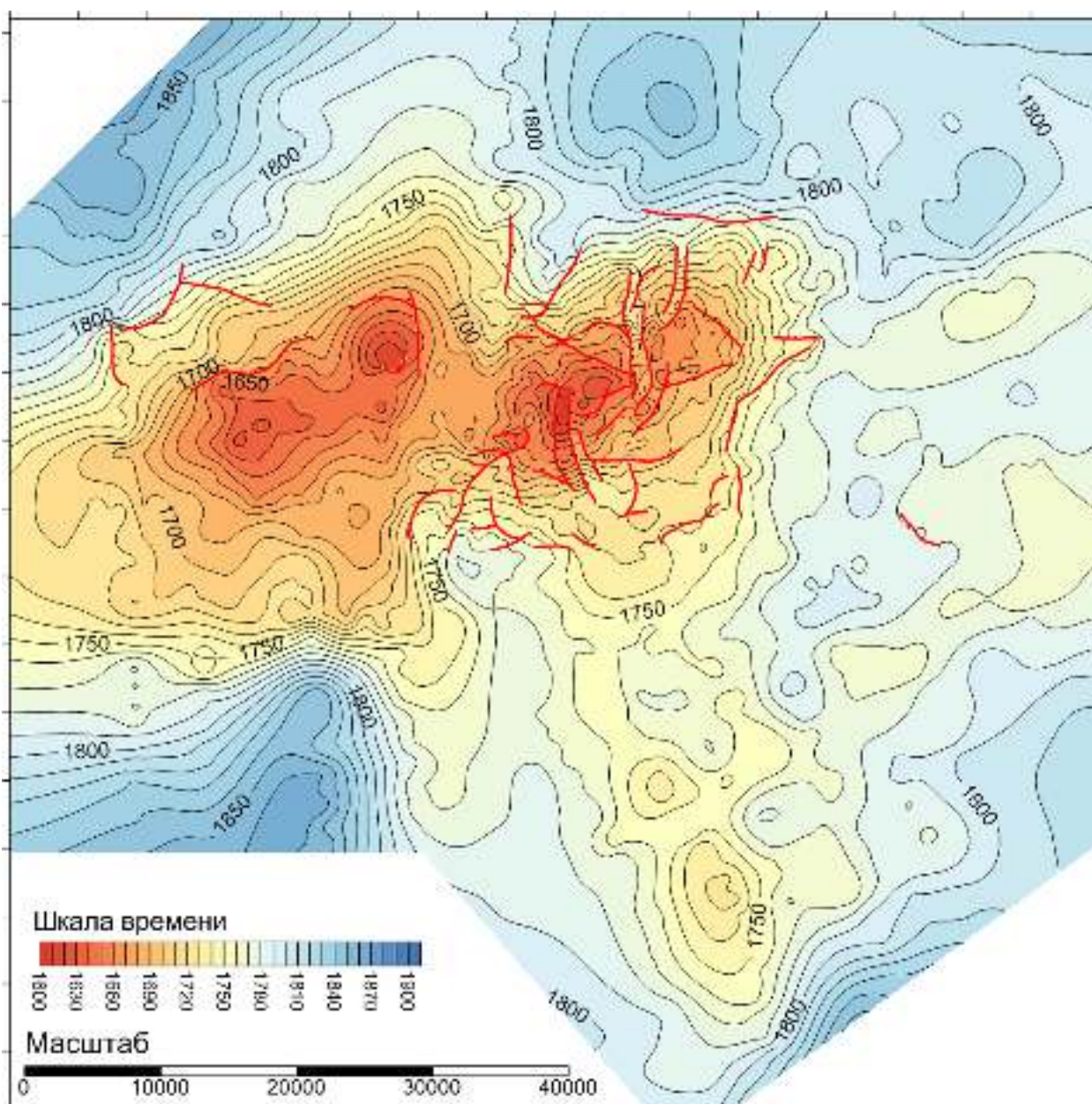


Рисунок 7.12 Карта изохор по отражающему горизонту М.

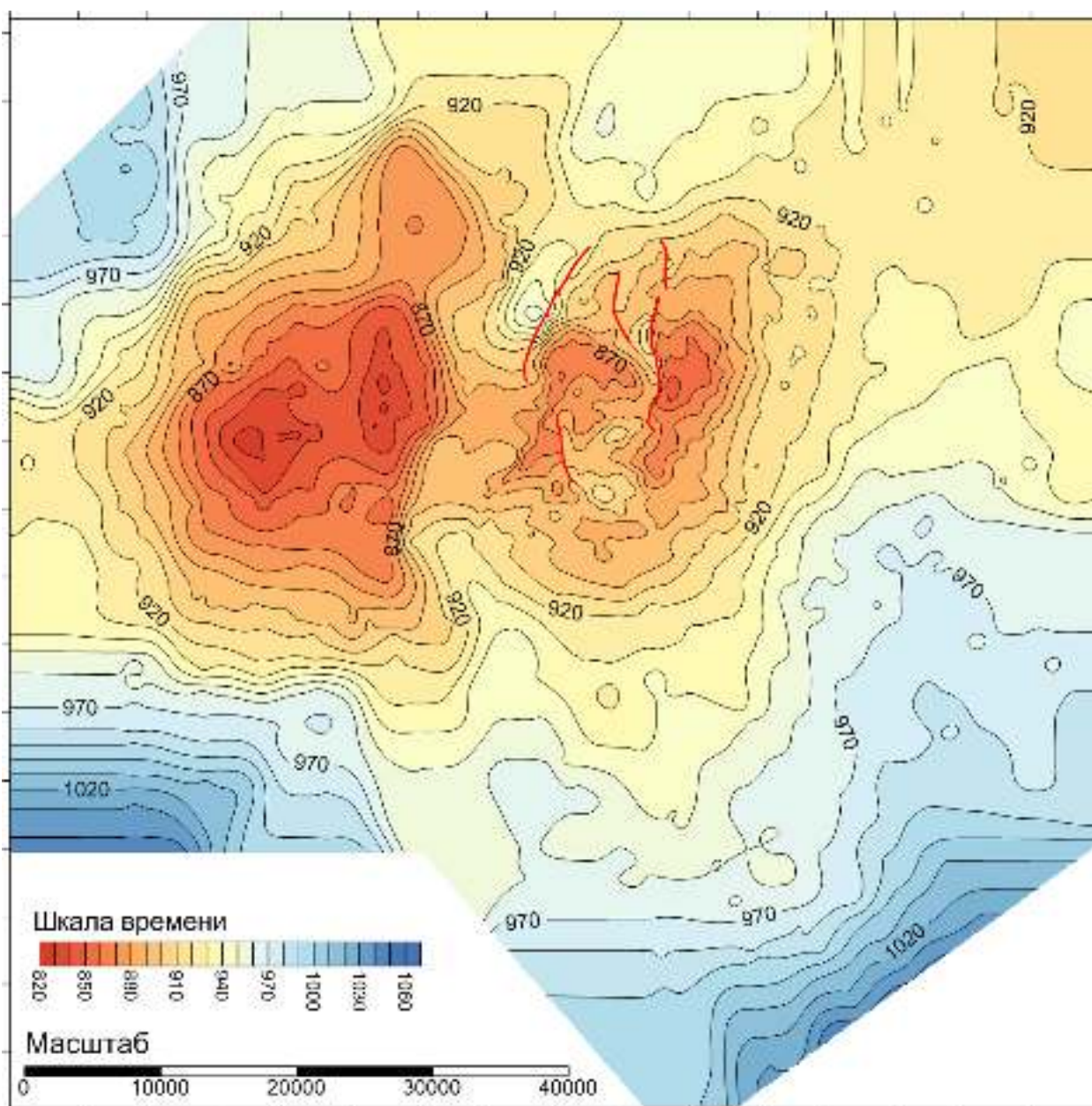


Рисунок 7.13 Карта изохор по отражающему горизонту С<sub>1</sub>.

**Построение структурных карт с использованием регрессионных зависимостей время-глубина на основе карт  $t_0$  и данных о глубинах отражающих горизонтов в скважинах.** Для решения данной задачи была использована авторская методика вычисления карт глубин на основе регрессионного анализа изменения глубины залегания геологических поверхностей, на которых формируются отражающие горизонты от времени их регистрации на сейсмических разрезах. Структурные карты полученные в результате вычисления уравнений регрессии, затем строго «подсаживались» на известные отметки в скважинах. Алгоритм, в котором участвуют две эти



процедуры, реализован в программе *RegressGridding*, входящей в состав программного продукта *GridBuilder-GridMaster* [Лапковский, Конторович, 2014]. В методическом отношении данный процесс описан в разделе 5.5 настоящей работы. Ниже приводится пример использования технологии при создании трех результирующих структурных карт Геофизического месторождения.

Поскольку, только три скважины вскрывают отражающий горизонт Б, использовались уравнения регрессии первой степени. Полученные результаты представлены в таблице 7.2.

Таблица 7.2 - Результаты вычисления уравнений регрессии значений глубины залегания трех отражающих горизонтов от времени их регистрации.

Индекс отражающего горизонта	Стратиграфическая приуроченность	Уравнение регрессии от значений $t_0$	Коэффициент корреляции
C <sub>1</sub>	Верхний мел. Кровля кузнецовской свиты	$z=-1.0185*t_0-5.3$	+0.77 (15 скважин)
М	Нижний мел. Внутри танопчинской свиты, между УП <sub>5</sub> и ТП <sub>16</sub> . Вблизи кровли нейтинской пачки.	$z=-0.8463*t_0-1284.0$	+0.85 (10 скважин)
Б <sup>-</sup>	Верхняя юра, кровля гольчихинской свиты	$z=-1.5609*t_0-321.4$	(3 скважины)

Три структурные карты, для которых приведены результаты решения уравнения регрессии, представлены на рисунках 7.14-7.16.

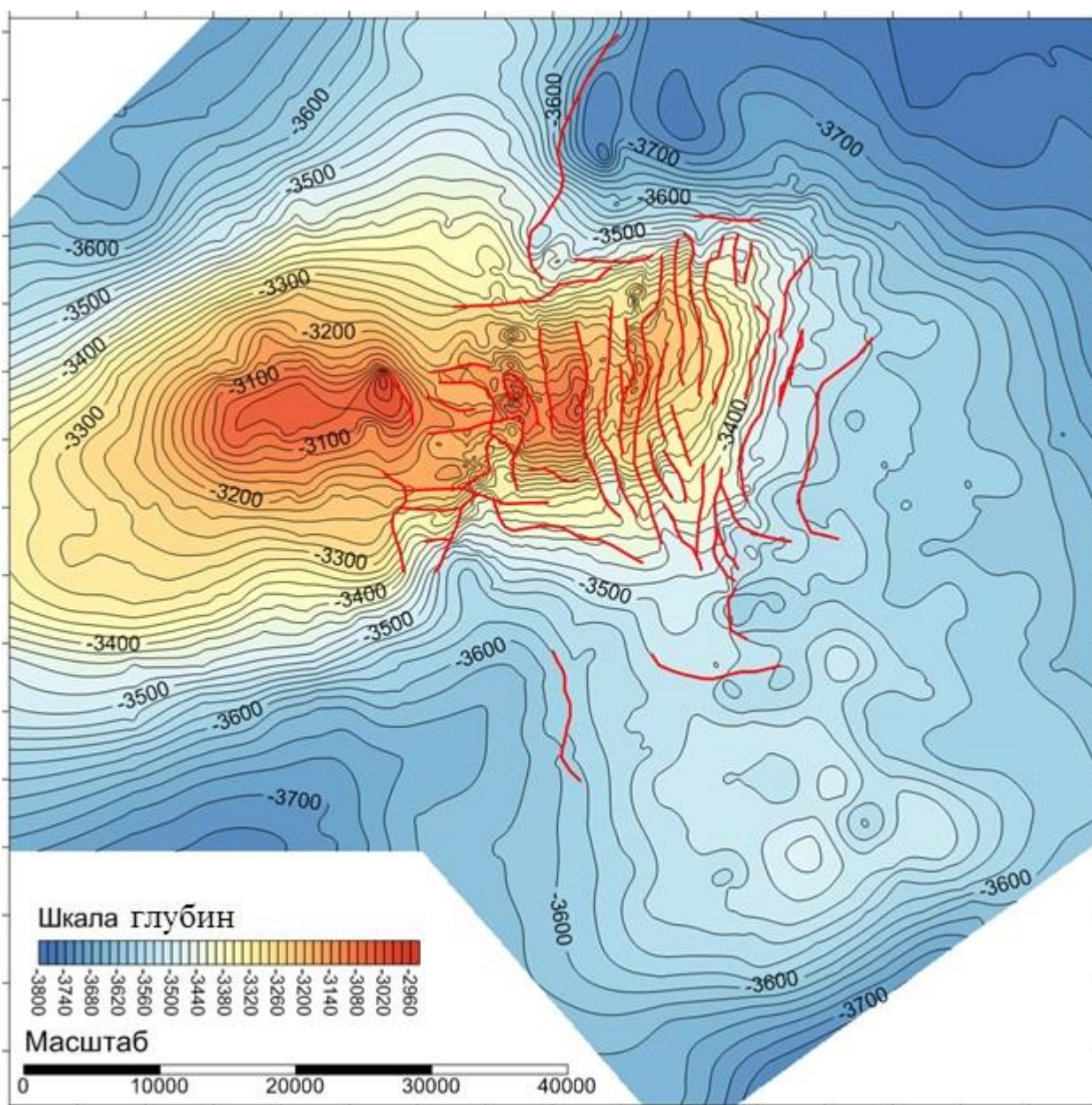


Рисунок 7.14 Структурная карта по отражающему горизонту Б.

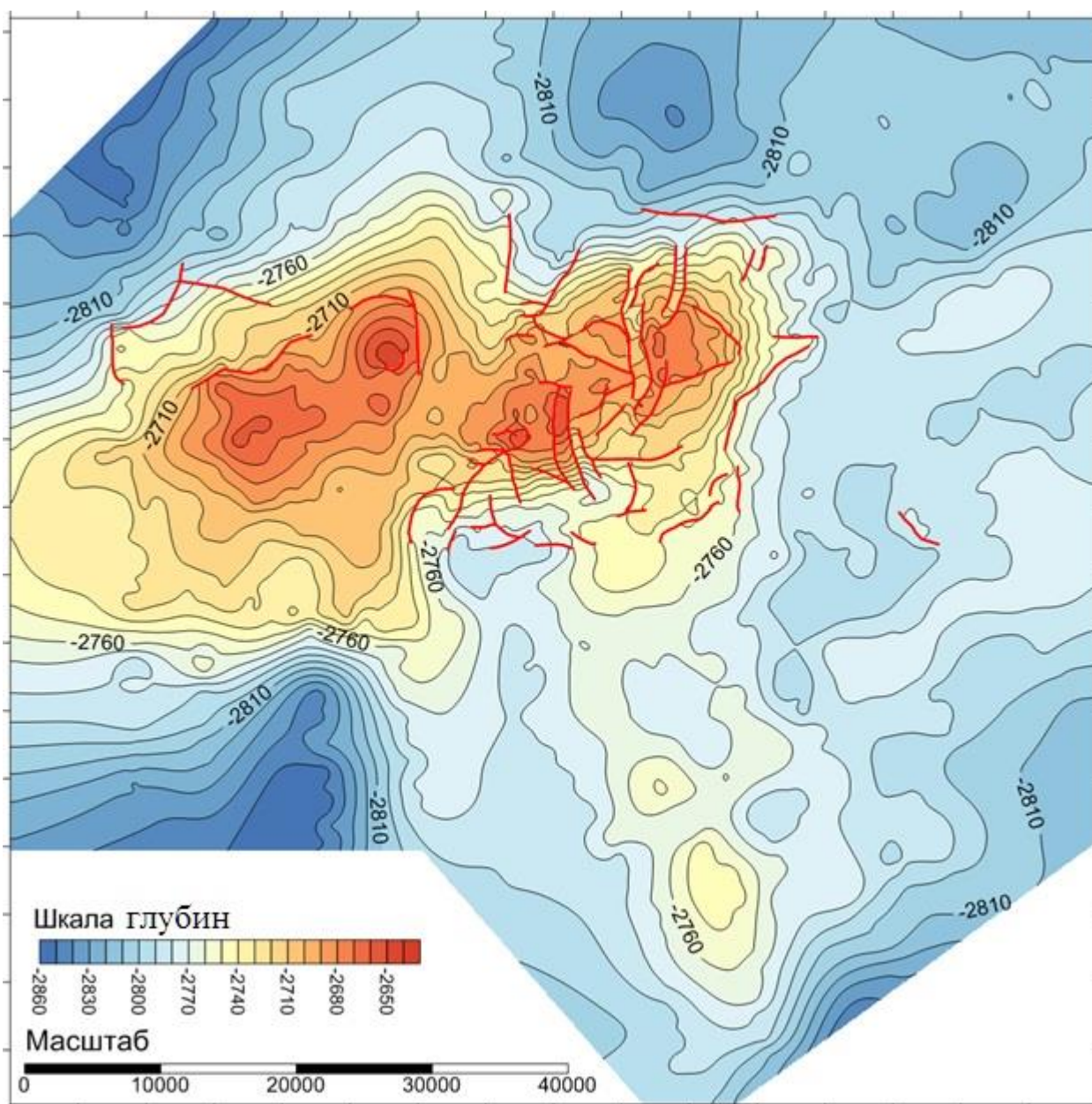


Рисунок 7.15 Структурная карта по отражающему горизонту М.

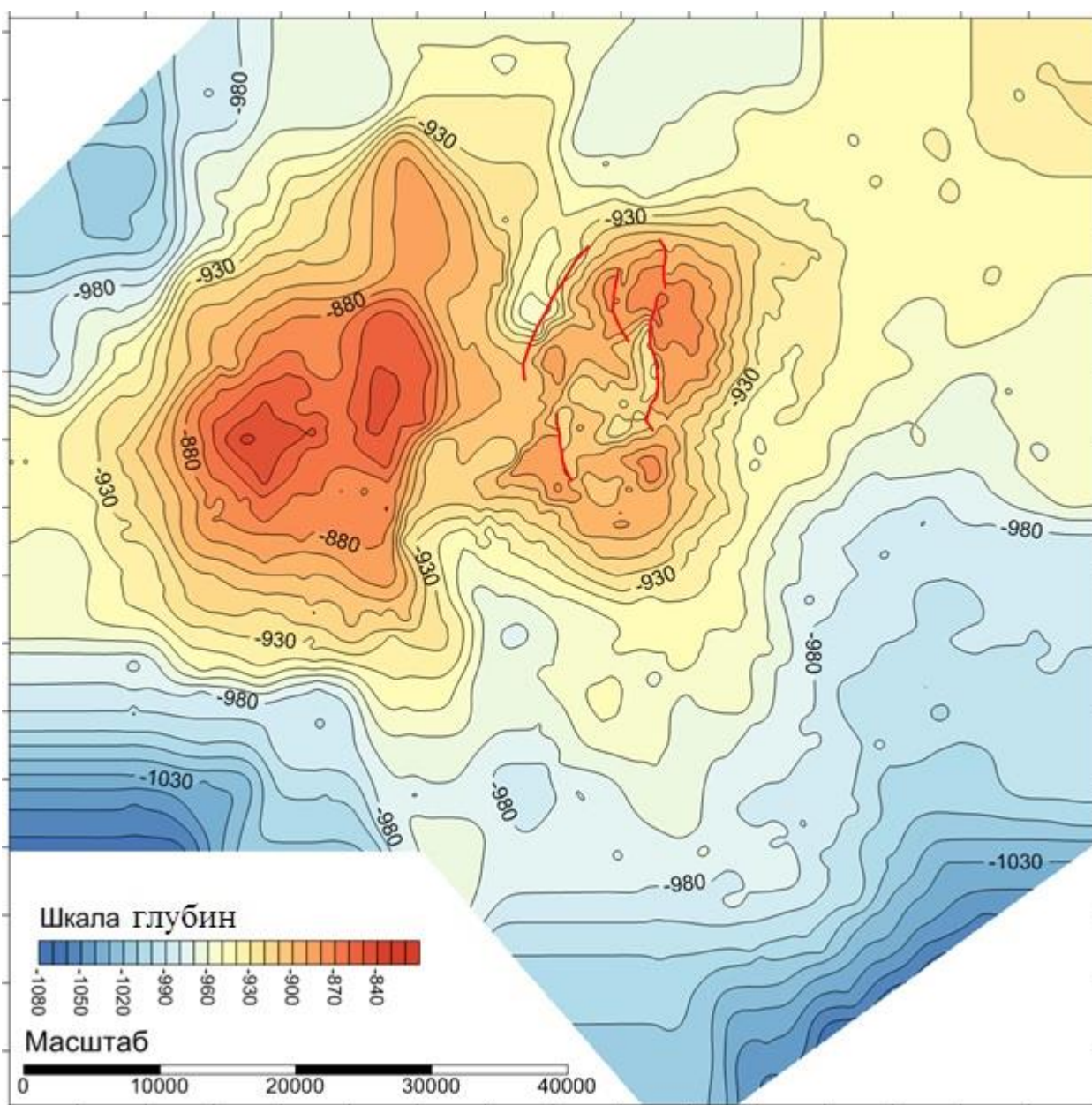


Рисунок 7.16 Структурная карта по отражающему горизонту С<sub>1</sub>.

Карты глубин отражающих горизонтов позволяют оценить распределение по площади средних и интервальных скоростей продольных волн. Эти оценки были выполнены и на рисунке 6.17, показаны результаты расчета средних скоростей продольных волн для горизонта Б.

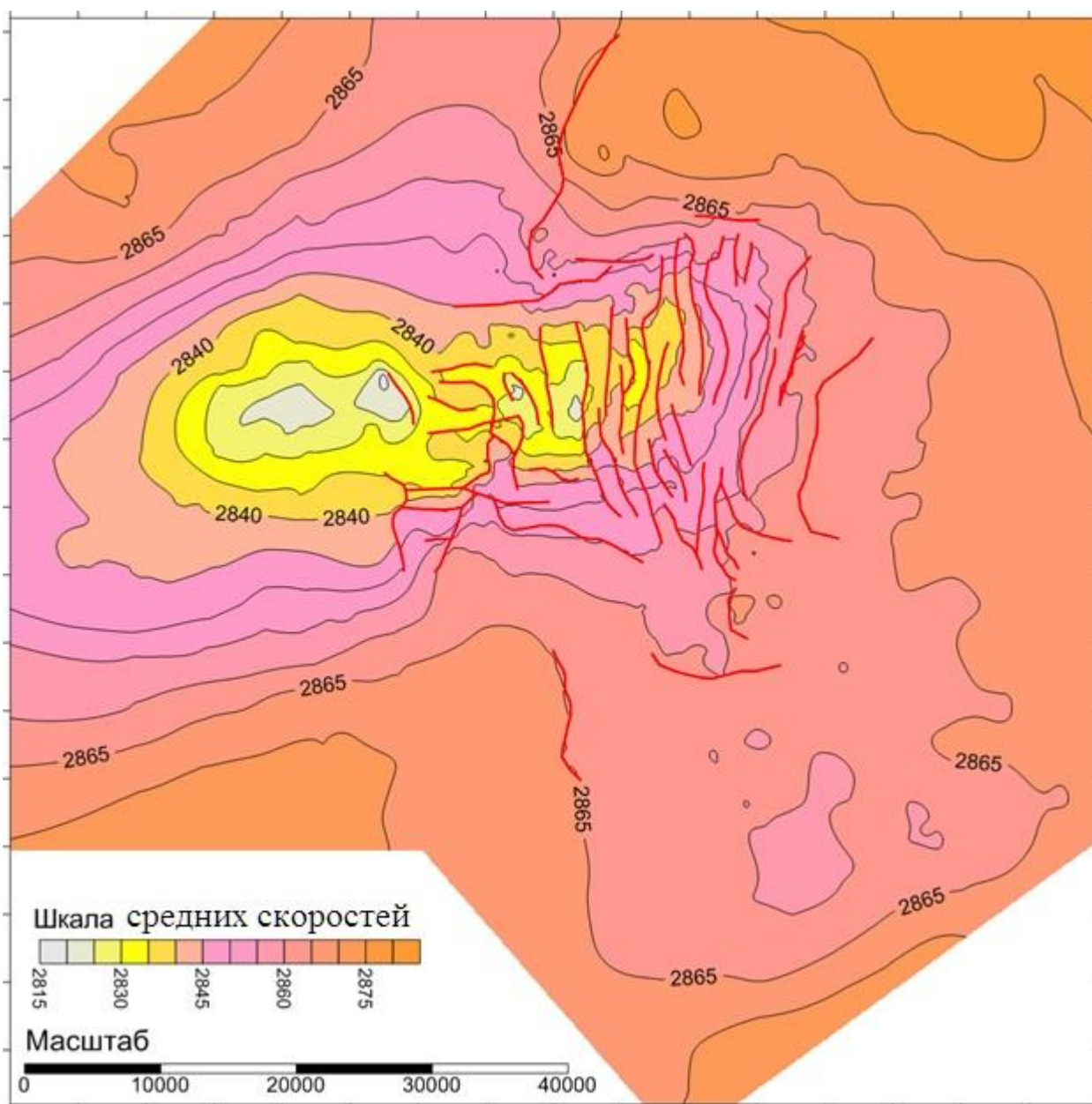


Рисунок 7.17 Карта средних скоростей продольных волн до отражающего горизонта Б.

На карте скоростей закономерным представляется то, что в сводовой части Геофизического поднятия средние скорости меньше, чем на его периферии. Это может быть связано с большим уплотнением пород на больших глубинах, а также уменьшением скоростей прохождения упругих колебаний в газонасыщенных слоях, газонасыщенность которых приурочена к сводовой части поднятия.

## 7.1 Краткая характеристика результатов структурных построений

Результаты анализа, построенных структурных карт (рисунки 7.14-7.16), позволяют сделать следующие выводы:

1. По структурному плану всех горизонтов Геофизическое месторождение расположено в восточной части крупной положительной структуры II порядка.

В рельефе юрских отражающих горизонтов Б, кровле берриас-нижнеаптского комплекса – горизонт М, на рассматриваемой территории, выделяется вытянутое в широтном направлении поднятие – Геофизический мезовал. Вверх по разрезу Геофизический мезовал меняет свои очертания и в структурных планах отражающего горизонта С<sub>1</sub>, приуроченного к кровле кузнецовской свиты, этот тектонический элемент приобретает изометричную форму – становится Геофизическим мезоподнятием.

2. Вверх по разрезу Геофизическое мезоподнятие (мезовал) увеличивается в размерах и теряет в контрастности. В рельефе кровли юры и неокома площадь Геофизического мезовала составляет порядка 700 км<sup>2</sup>, в структурном плане кровли сеномана площадь Геофизического мезоподнятия достигает 1600 км<sup>2</sup>, т.е. увеличивается более чем в 2 раза.

Амплитуда Геофизической структуры II порядка в рельефе кровли юры составляет 395 м, в рельефе кровли неокома и сеномана 165 м. Это позволяет сделать вывод о том, что это поднятие наиболее интенсивно развивалось в берриас-раннем апте, несколько менее интенсивно в посттуронское время и крайне вяло в апт-альб-сеномане.

3. В рельефе всех стратиграфических уровней в западной части Геофизического мезовала (мезоподнятия) в акватории Обской губы получила развитие относительно крупная контрастная положительная структура – Западно-Геофизическое куполовидное поднятие, осложненное двумя локальными поднятиями.

Что касается территории Геофизического месторождения, то в этой зоне единой крупной замкнутой структуры нет. В рельефах всех опорных отражающих горизонтов здесь выделяется серия относительно небольших по размерам локальных поднятий, причем эти поднятия далеко не всегда являются сквозными,

и в структурных планах различных стратиграфических уровней смещены относительно друг друга по латерали.

## **7.2 Корреляционная модель строения яронгской свиты на Геофизической площади**

Эта работа была выполнена средствами программного расширения (плагины) *MultiWellCorrelation* для *Petrel Schlumberger*. Данный плагин разработан совместно с В.А. Бердовым и А.А. Власовым [Бердов и др. 2014] в постановке и на основе оптимизационного метода, предложенного автором.

### **7.2.1 Выбор объекта моделирования**

Автоматическая корреляция разрезов скважин в предложенной постановке оказывается достаточно чувствительной к ошибкам в исходных данных, а также к их существенной неоднородности. Метод требует постоянного контроля со стороны интерпретатора в ситуациях, когда каротажные кривые не полностью характеризуют коррелируемый интервал разреза. Если для какой-либо из скважин полностью отсутствуют данные одного из методов каротажа, то проблем обычно не возникает, поскольку сопоставление этой скважины с её соседями возможно на основании других каротажных кривых. Более сложная ситуация возникает, когда в интерпретируемом диапазоне разреза имеются пропуски в записях значений используемых каротажных кривых. Поэтому интерфейс модуля автоматической корреляции содержит специальный переключатель, позволяющий использовать только полные каротажные кривые. На Геофизической площади пробурено 15 скважин. Из них только три достигают кровли гольчихинской свиты (горизонт Б). В области распространения танопчинской свиты часто встречаются интервалы отсутствия каротажных записей даже по стандартному зонду. Поэтому, для демонстрации возможностей метода автоматической корреляции был выбран диапазон глубин яронгской свиты, характеризующийся тем, что по всем 15-ти скважинам имеется непрерывный каротаж методом самопроизвольной поляризации, и почти по всем скважинам – индукционный каротаж.

### 7.2.2 Определение границ стратиграфического диапазона яронгской свиты в скважинах

Изначально для определения границ коррелируемого интервала были использованы отметки глубин кровли и подошвы яронгской свиты в скважинах Геофизического месторождения, предоставленные специалистами, ранее выполнившими стратиграфическую интерпретацию для этой площади. Соответствующие таблицы были заполнены в проекте *Petrel*. В этот же проект загружались каротажные данные по всем скважинам месторождения. Затем работа выполнялась с помощью плагина *MultiWellCorrelation*. А именно, были сгенерированы пары скважин, для которых рассчитаны парные меры различия по комплексу из каротажных кривых **SP** и **IK** (метод самопроизвольной поляризации и индукционный каротаж). Пары скважин генерировались путём триангуляции и заданием одной опорной скважины. В качестве опорной использована 46-я скважина Геофизической площади. Полученная схема парных сопоставлений приведена на рисунке 7.18.



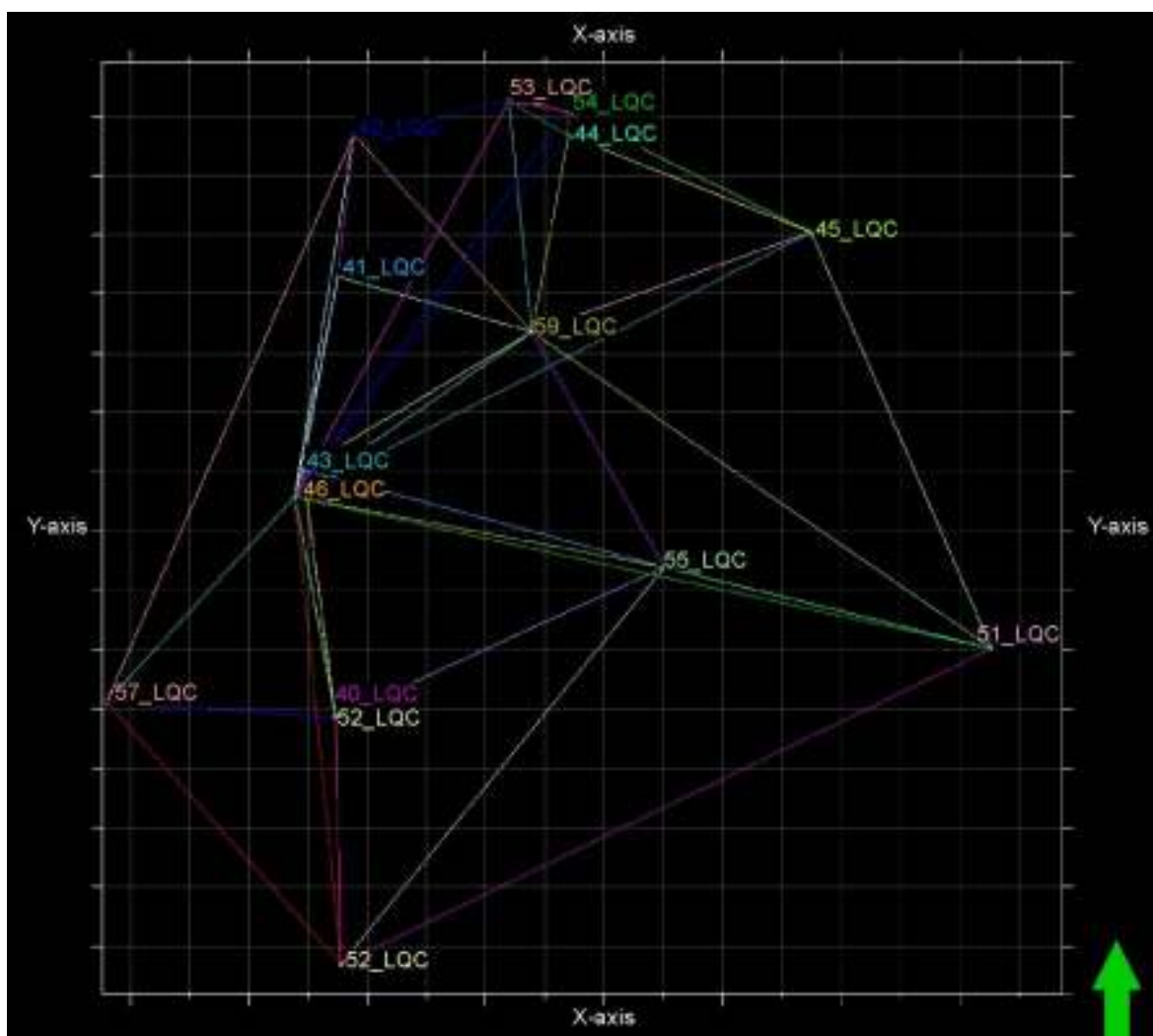


Рисунок 7.18 Парные сопоставления скважин Геофизической площади, использованные для расчетов парных (базовых) мер различия.

Для каждого ребра графа, показанного на Рисунке 7.18, была вычислена карта парной меры различия при одинаковых параметрах. Эти карты, необходимые для вычисления многомерных мер различия, записываются в виде самостоятельных объектов проекта *Petrel* и могут быть легко визуализированы, что и было сделано. Одной из карт характеризовала степень различия между глубинами в 46-й и 52 скважин. В изначальном виде она показана на Рисунке 7.19.

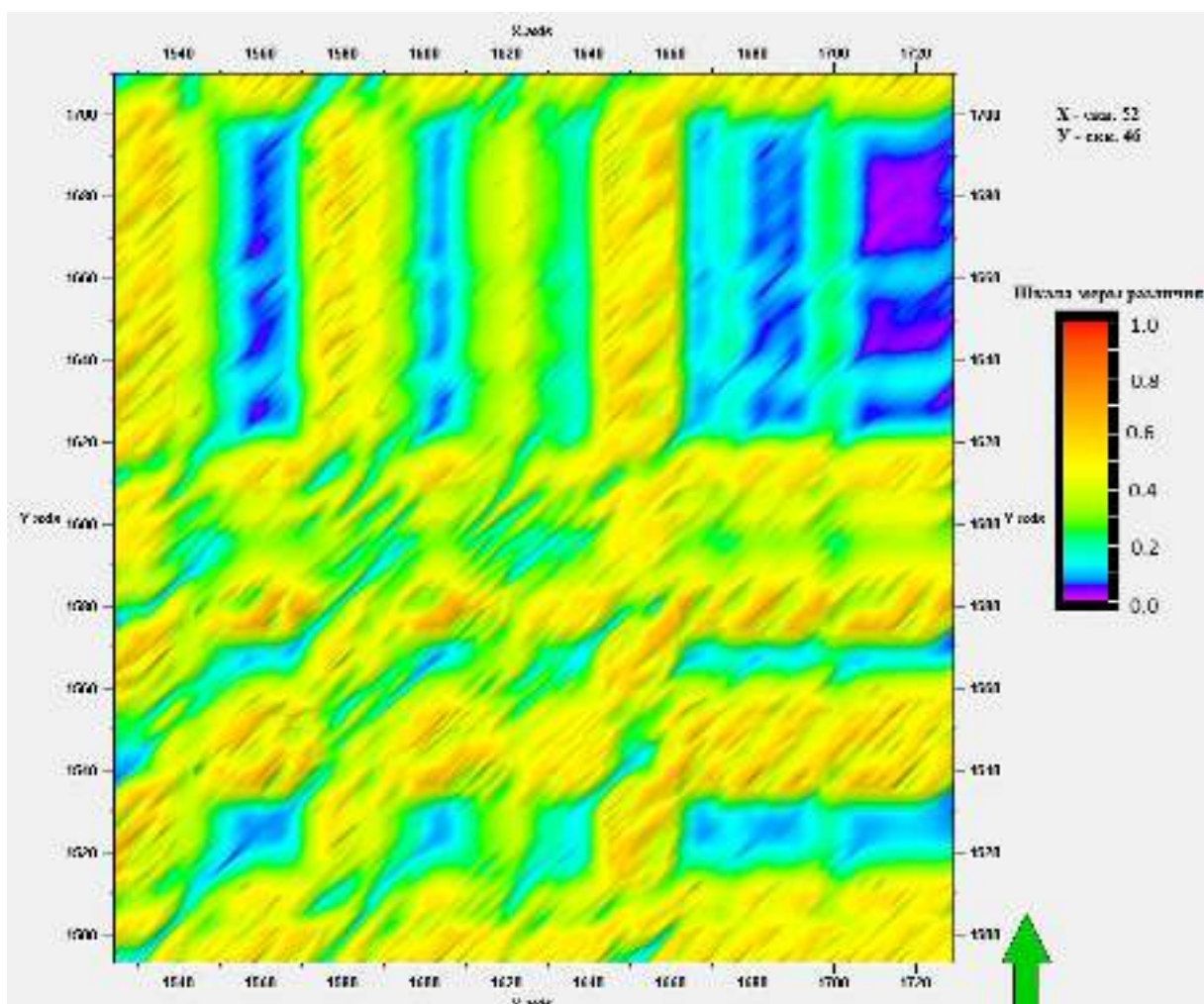


Рисунок 6.19 Карта меры различия стратиграфического диапазона яронгской свиты 52-й и 46-й скважин Геофизического месторождения.

Беглого взгляда на эту модель достаточно, чтобы увидеть труднообъяснимую особенность - от левого нижнего угла видна четкая, очень узкая диагональная и почти линейная область низких значений поля различия. Этой области, безусловно, соответствует оптимальная модель корреляции, но она заканчивается не в правом верхнем углу, а примерно на 20 метров ниже по стволу 46-й скважины. Таким образом, либо соответствующие осадки (около 20-ти метров мощности) отсутствуют в ней, а это достаточно странно в силу того, что проявляется линейный характер отношений мощностей слоев на протяжении всего стратиграфического диапазона яронгской свиты в этих двух скважинах, либо была допущена ошибка в задании отметки кровли свиты в одной из скважин. Такая ошибка действительно была обнаружена в исходных данных. После её

исправления соответствующая карта меры различия выглядят так, как это показано на Рисунке 7.20.

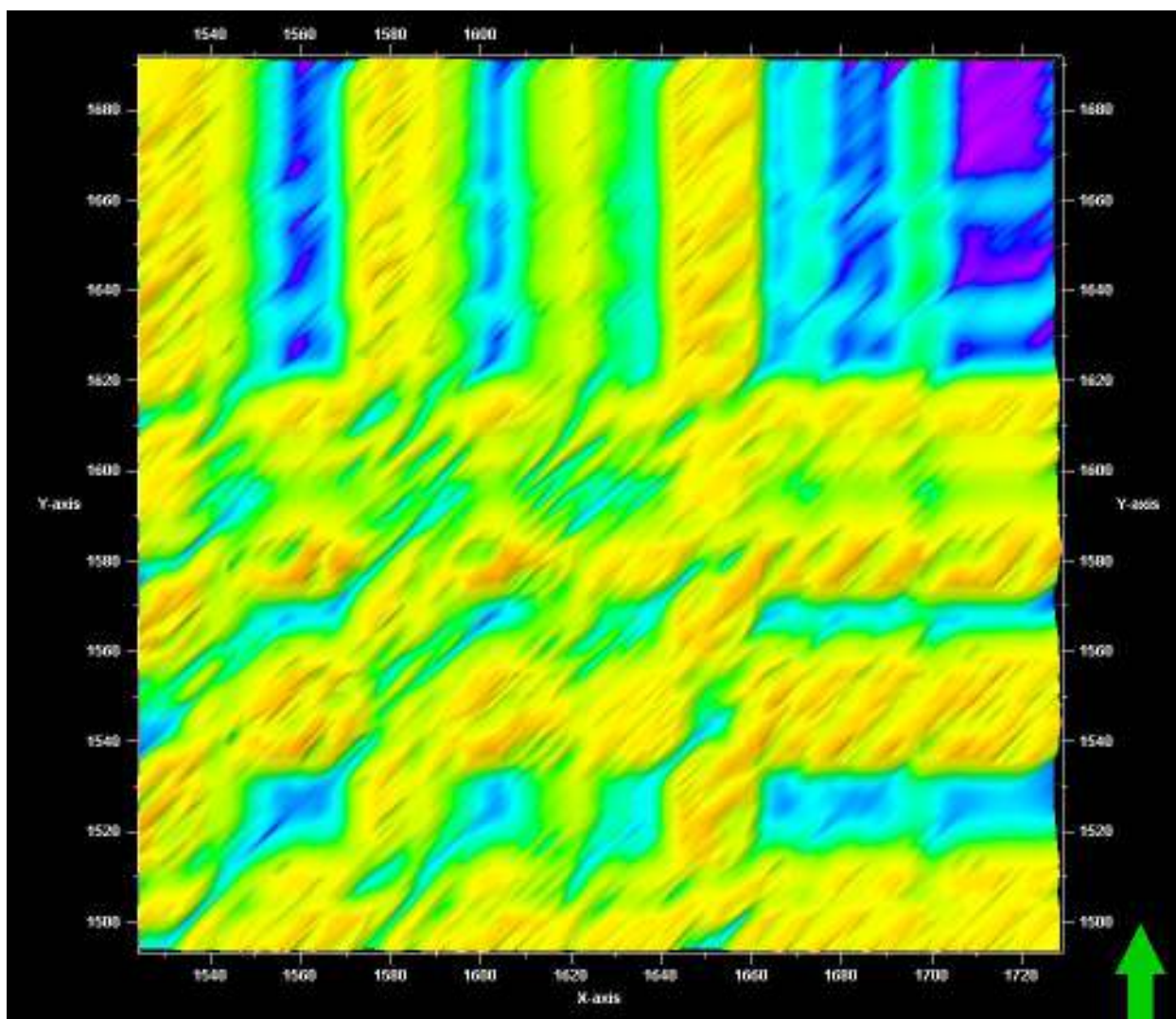


Рисунок 7.20 Карта меры различия стратиграфического диапазона яронгской свиты 52-й и 46-й скважин Геофизического месторождения после коррекции. Шкала меры различия показана на рисунке 7.19.

Такой характер корреляции хорошо соответствует представлениям о морских условиях накопления отложений яронгской свиты, связанной с раннеальбской трансгрессией [Конторович и др., 1975]. В практическом отношении важно то, что данный вид моделей (парные карты меры различия) является хорошим инструментом для обнаружения ошибок в исходных стратиграфических данных. И следующее, что было сделано – просмотрены все карты парных мер различия. Как результат этого процесса - в более чем половину стратиграфических разбивок границ яронгской свиты пришлось внести

некоторые изменения, хотя собственных ошибок формирования таблицы глубин границ свит больше выявлено не было. В качестве примера, обоснования необходимости внесения изменений в таблицы разбивок, приведена карта меры различия для скважин 40 и 52 - Рисунок 7.21.

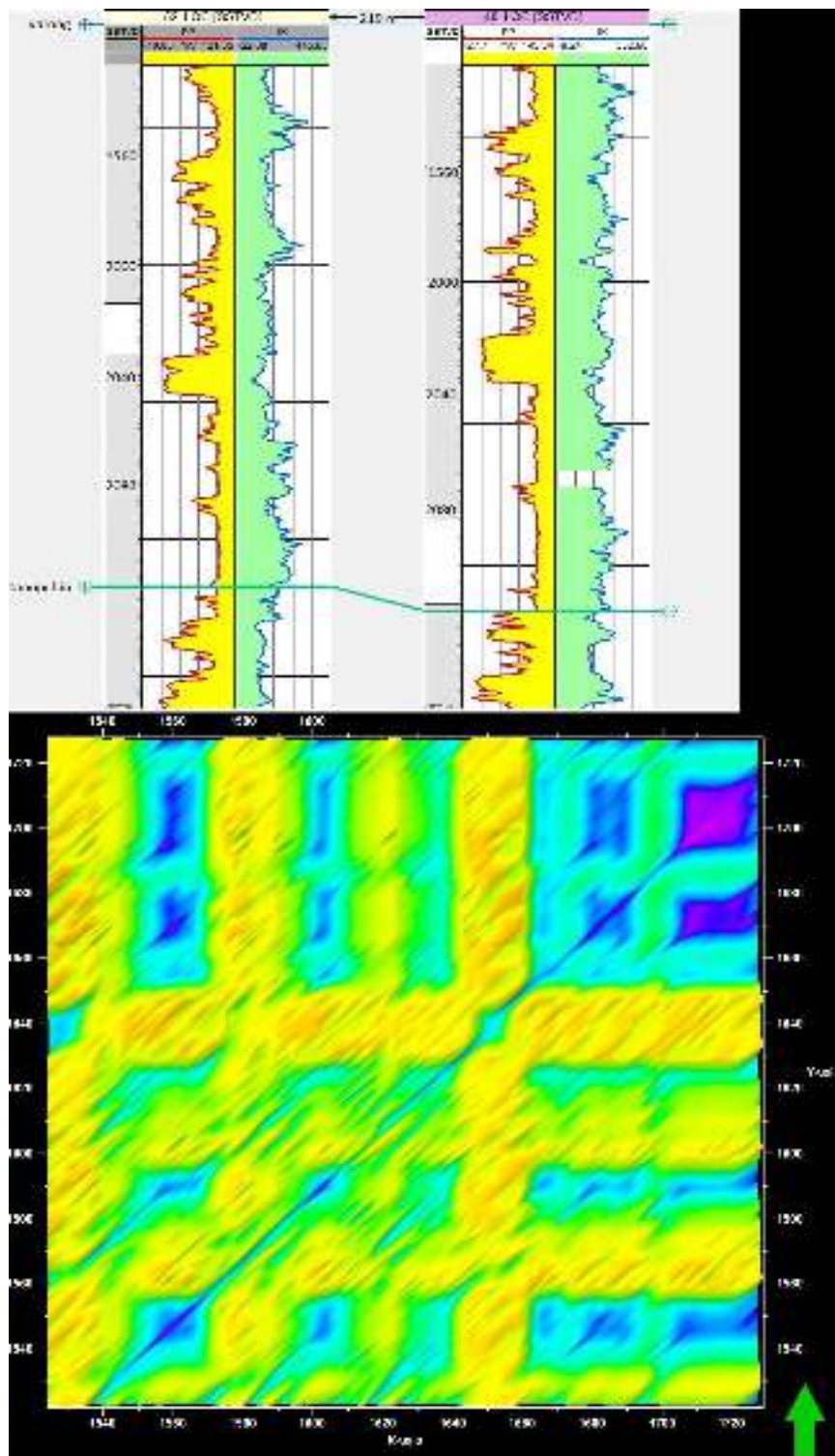


Рисунок 7.21 Положение границ яронгской свиты на разрезе и карта меры различия для 40-й и 52-й скважин Геофизического месторождения. Шкала меры различия показана на рисунке 7.19.

На карте меры различия, диагональная линейная область низких значений выходит на нижнюю и правую границы в стороне от углов карты. Это свидетельствует о высокой вероятности ошибок как в задании кровли, так и в задании подошвы яронгской свиты для данных скважин. Величина ожидаемых ошибок составляет около 10 метров. Очевидно, что подошву яронгской свиты надо либо опустить в 52-й скважине примерно на 12 метров до уровня кровли глинистого пласта (что и было сделано с учетом вида этой границы в других скважинах), либо поднять её в 40-й скважине на те же 12 метров, немногим выше узкой отрицательной аномалии значений **SP**. Для этой пары скважин, также пришлось корректировать и положение кровли свиты. Интересно то, что ошибки корреляции, которые весьма убедительно выявляются на картах меры различия, и подтверждаются при внимательном рассмотрении каротажных графиков, не были выявлены ранее специалистами, проводившими расчленение ствола скважин для целей создания стратиграфической модели и подсчета запасов месторождения.

В результате этой работы мною была принята собственная модель выделения яронгской свиты, на основе которой построена её послойная корреляция.

### **7.2.1 Послойная корреляция отложений яронгской свиты**

Для послойной корреляции яронгской свиты было выделено 20 границ, которые обоснованы скачкообразным изменением значений кривых PS и IK. При этом, часть выделенных тел отличаются большей песчанистостью, а часть оказались более глинистыми. Границы выделялись автоматически с использованием дисперсионного анализа средствами плагина *MultiWellCorrelation* без ручной коррекции. В решении реальных производственных задач (а не на тестовых вычислениях) любая, из установленных границ, может быть удалена или сдвинута по разрезу скважины. Все границы пластов в опорной 46-й скважине представлены на рисунке 7.22.

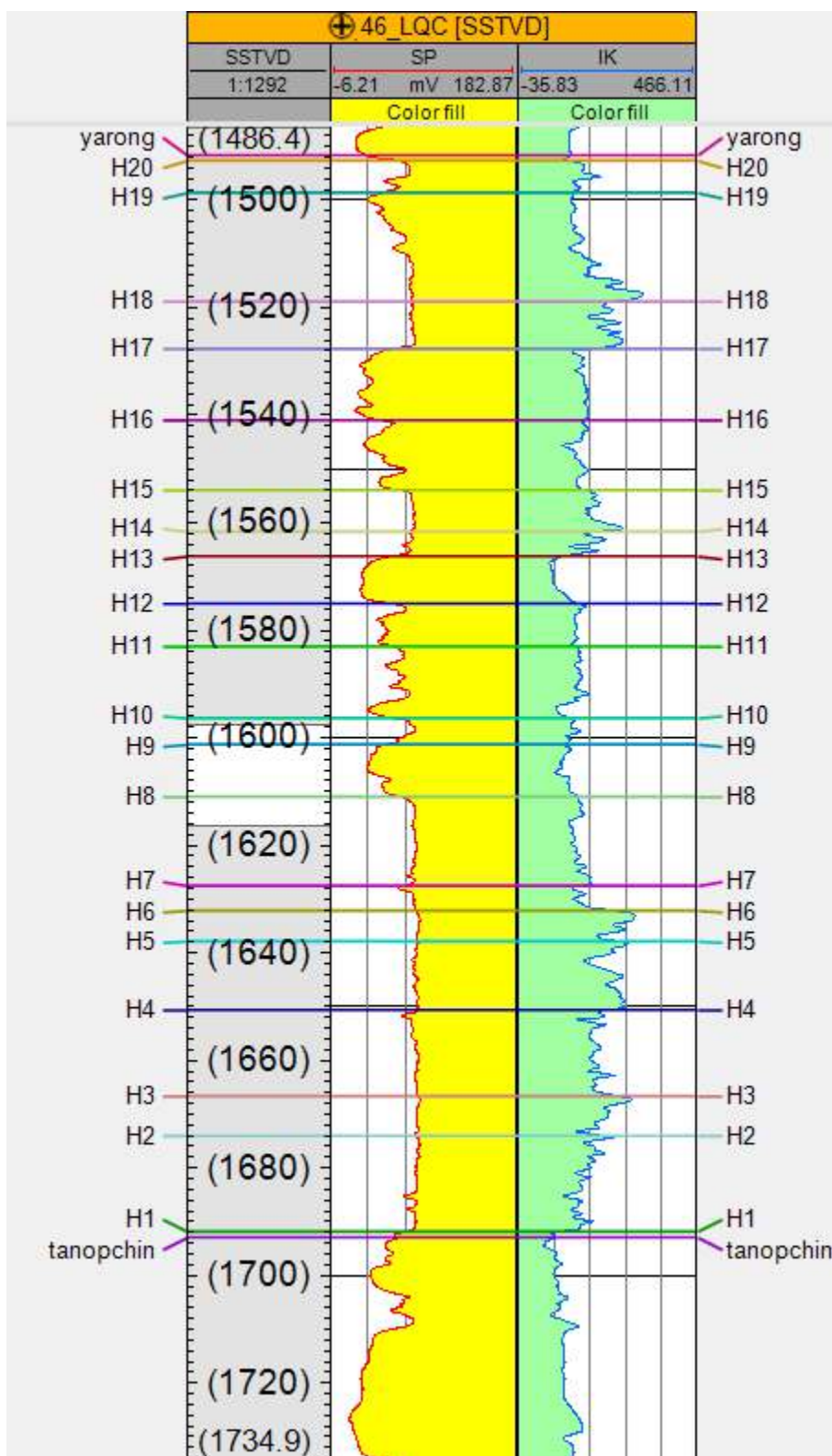


Рисунок 7.22 Выделение границ пластов в опорной 46-й скважине Геофизического месторождения.

Послойная корреляционная модель яронгской свиты получена с использованием режима последовательного присоединения скважин с помощью решения задачи проведения линии оптимальной корреляции в многомерном поле различия с

использованием волнового алгоритма Ли. Достаточно подробно теоретическая сторона этого метода освещена во второй главе настоящей работы. Отметим, что представленное ниже решение не подвергалось редактированию интерактивными средствами плагина, поскольку, на взгляд автора, оно являлось достаточно обоснованным, и в таком редактировании не было необходимости.

После первого шага, к создаваемому корреляционному решению (то есть к 46-й скважине), была присоединена 41-я скважина. Планшет Жековского с линией оптимальной корреляции и традиционный вид сопоставления скважин показан на рисунке 7.23.

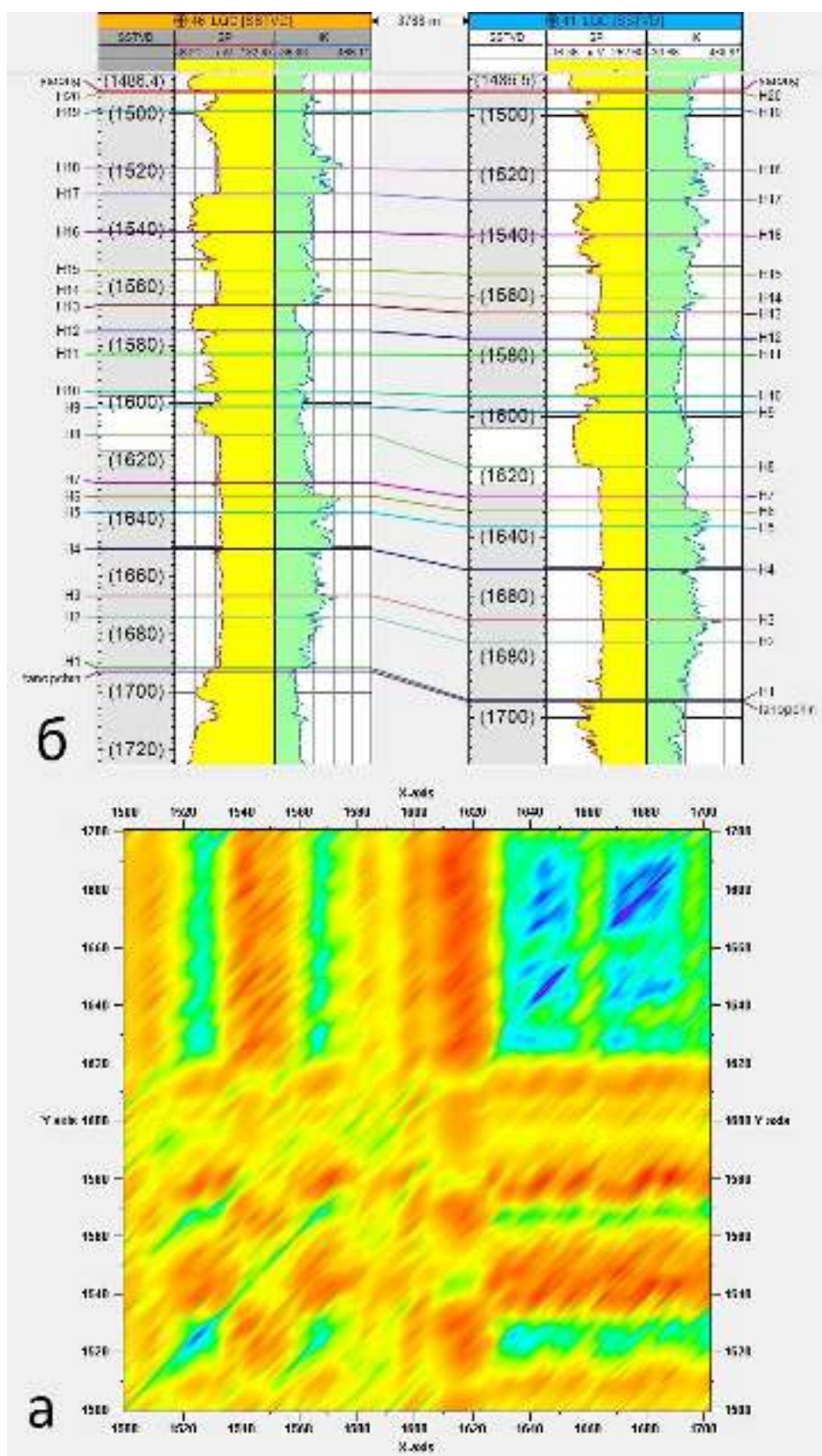


Рисунок 7.23 Послойная корреляционная модель яронгской свиты для 46 и 41 скважины. а – планшет Жековского со значением функции меры различия (оранжевые и коричневые тона означают высокую меру различия), б – отвечающая решению оптимальной корреляции, традиционное представление соответствия слоёв 46 и 41 скважин. Шкала меры различия показана на рисунке 7.19.



На следующем шаге была присоединена 42 скважина, полученный результат показан на Рисунке 7.24. На планшете Жековского по оси X отложены согласованные пары глубин 46-й и 41-скважины. Это, как бы распрямленная линия оптимальной корреляции рисунка 7.24а. По оси Y отложены глубины интервала залегания яронгской свиты в 42-й скважине. Оптимальной корреляционной модели для этих трех скважин соответствует схема – Рисунок 7.24б.

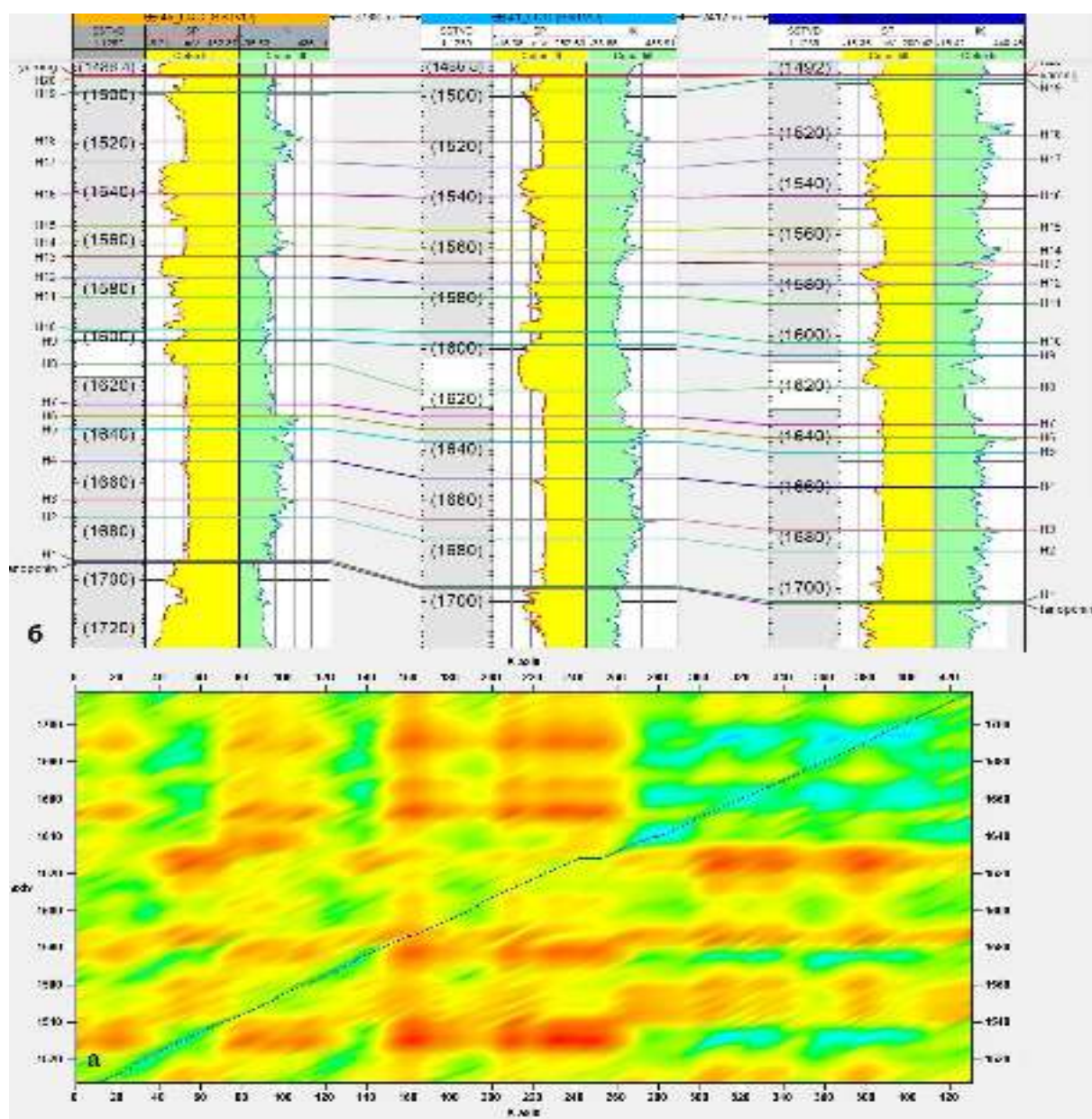


Рисунок 7.24 Послойная корреляционная модель яронгской свиты для 46, 41 и 42 скважины. а – планшет Жековского со значением функции меры различия, б – отвечающая решению оптимальной корреляции, традиционное представление соответствия границ слоёв. Шкала меры различия показана на рисунке 7.19.

На двух следующих рисунках 7.25 и 7.26 показана модель, полученная в результате последовательного присоединения к решению 57-й и 56-й скважин.

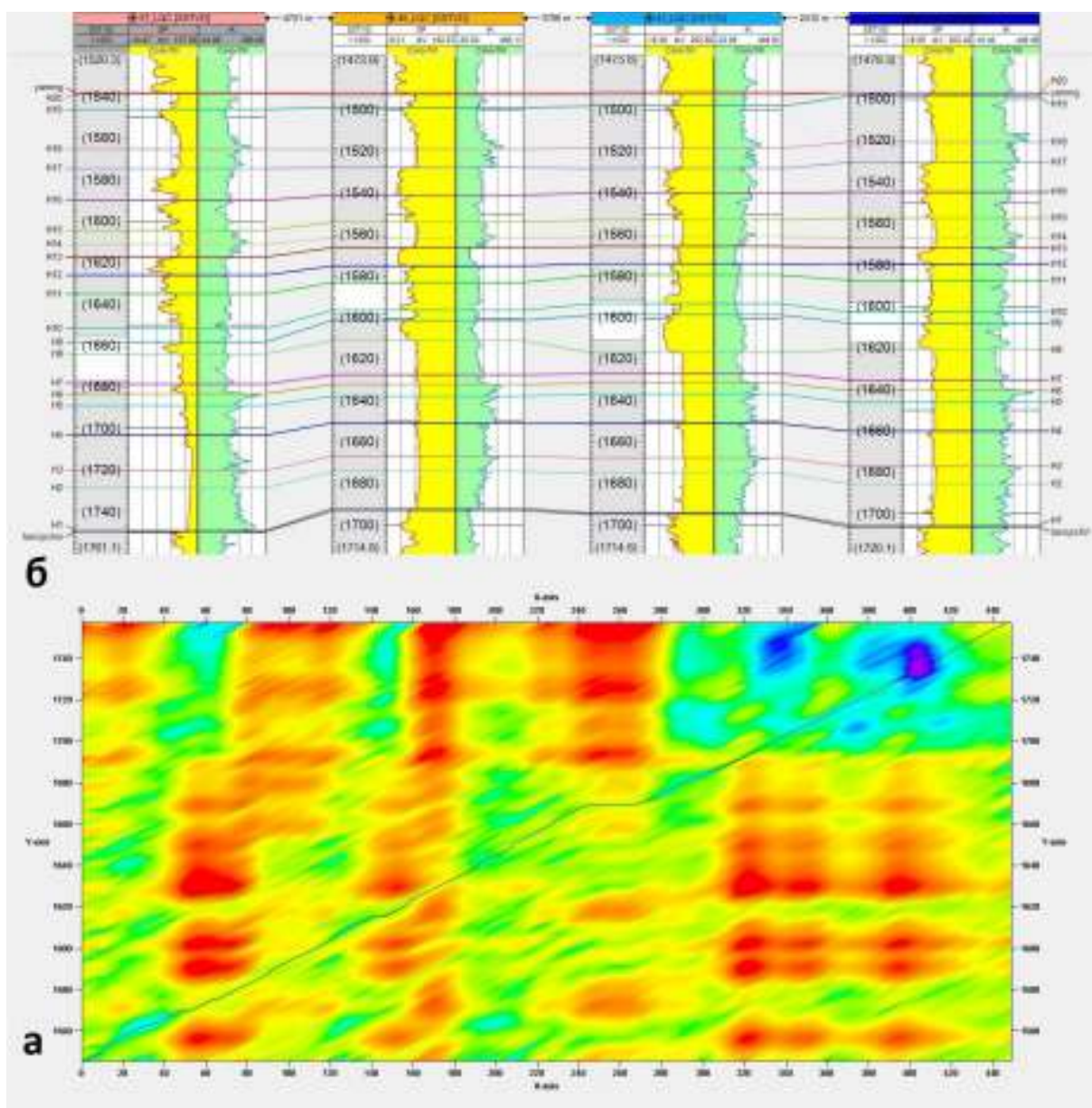


Рисунок 7.25 Послойная корреляционная модель яронгской свиты после присоединения 57-й скважины. а – планшет Жековского со значением функции меры различия, б – отвечающая решению оптимальной корреляции, традиционное представление соответствия границ слоёв. Шкала меры различия показана на рисунке 7.19.

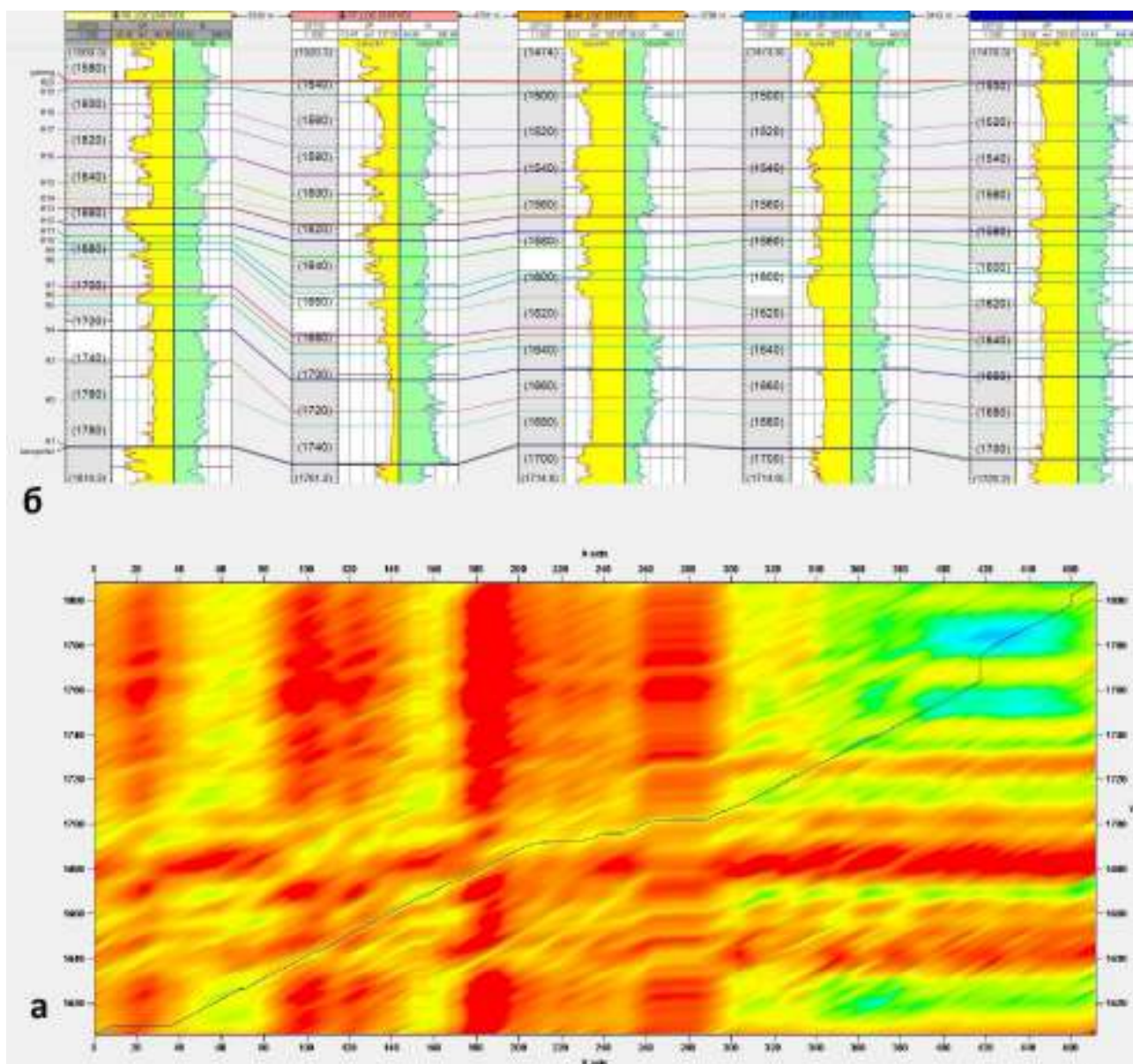


Рисунок 7.26 Послойная корреляционная модель яронгской свиты после присоединения 56-й скважины. а – планшет Жековского со значением функции меры различия, б – отвечающая решению оптимальной корреляции, традиционное представление соответствия границ слоёв. Шкала меры различия показана на рисунке 7.19.

Окончательный вариант решения со всеми скоррелированными 15-тью скважинами показан на рисунке 7.27.

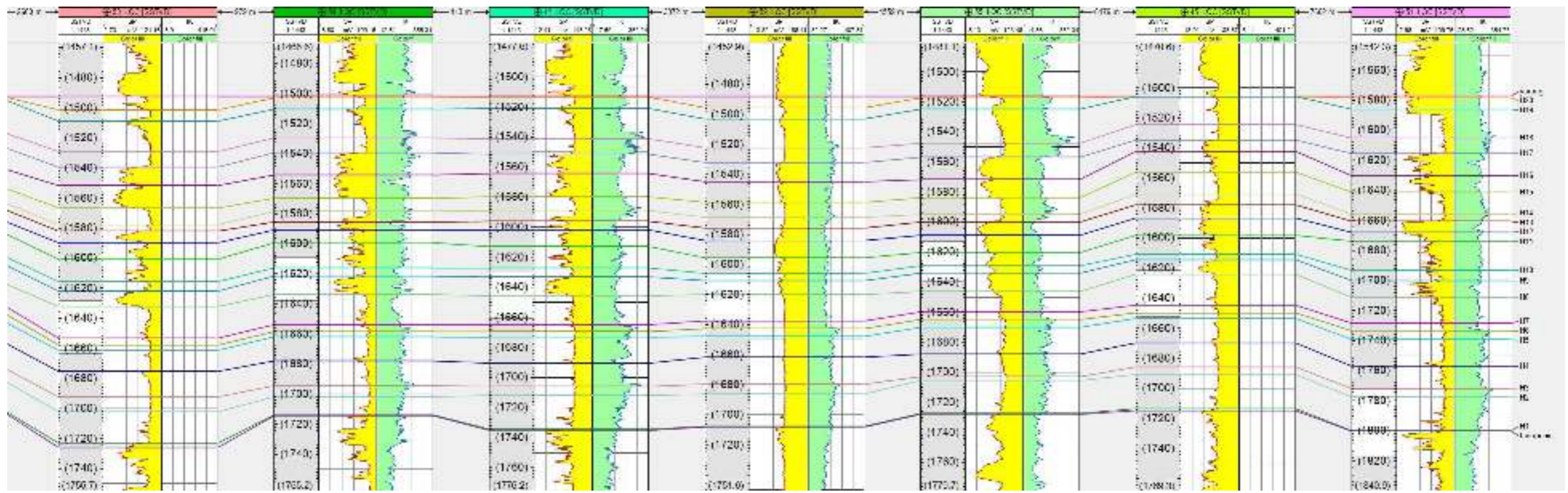
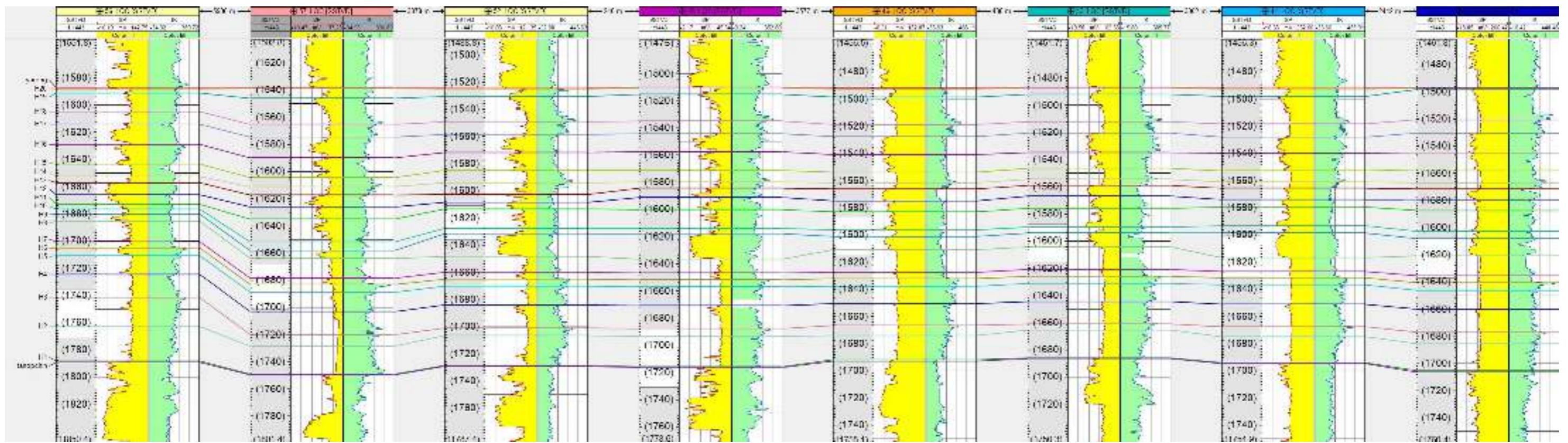


Рисунок 7.27 Окончательный вариант корреляции слоёв яронгской свиты Геофизического месторождения.

## **Выводы:**

1. Благодаря использованию разработанных методик оптимизационного моделирования была построена комплексная, согласованная структурная сейсмогеологическая модель Геофизического нефтегазоконденсатного месторождения. Использование технологии поиска форм, похожих на уступы, совместно со структурной интерпретацией 2D и 3D сейсмических данных позволило обосновать существование систем разрывных нарушений по основным сеймостратиграфическим комплексам месторождения. Структурные карты с учетом разрывных нарушений получены на основе линейных регрессионных моделей и уточнены путем точной увязки с имеющимися скважинными данными.
2. Применение методики автоматической корреляции скважинных данных путем расчета многомерных мер различия и построения линии оптимальной корреляции, на планшетах Жековского, позволило уточнить стратиграфический объем яронгской свиты и получить оптимальную, по всему сопоставляемому объему отложений, послойную модель её строения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационного исследования разработан комплекс средств моделирования геологического строения нефтегазоносных территорий, в основе которого лежат методы математической оптимизации. Основные результаты выполненного исследования сводятся к следующему:

1. Разработан метод корреляции пластов по данным ГИС на основе вычисления парных и многомерных мер различия фрагментов разрезов скважин с оптимизацией решения по критерию многомерного минимального интегрального различия. Корреляция разрезов множества скважин сформулирована как оптимизационная задача нахождения лучшей траектории в поле многомерной функции различия. Эффективное решение данной задачи может обеспечиваться вычислением многомерных мер различия, характеризующих общую похожесть фрагментов нескольких скважин. Именно использования методики вычисления многомерных мер различия, явилось новым вкладом автора в общую проблематику создания автоматизированных интерактивных систем корреляции разрезов скважин. Существенным достижением является также включение модуля автоматизированной корреляции в индустриальные средства интерпретации геолого-геофизических данных.
2. Разработан метод получения обобщенной геофизической модели разреза на основе корреляционных решений и осреднения фрагментов каротажных кривых, соответствующих изохорным интервалам разреза. Такие обобщенные модели могут рассматриваться как эталонные для нефтегазоносных провинций, областей, районов или отдельных месторождений. Показана возможность создания трехмерных моделей распределения свойств в слоистой среде на основе взвешенного обобщения различных скважин с учетом корреляционных отношений.

3. Разработан метод и технология построения непрерывной сейсмостратиграфической модели для глубинных или временных кубов МОГТ, обеспечивающие высокоточную количественную сейсмостратиграфическую параметризацию любых частей разреза (куба), на основе попарного оптимального по всему временному или глубинному интервалу сопоставления сейсмических трасс. Получаемая параметризация может быть эффективным средством при структурной интерпретации сейсмических данных, при создании моделей распределения физических свойств, интеграции скважинных и сейсмических данных, создании кубов когерентности и обнаружения разрывных нарушений.
4. Метод картирования поверхностей геологических тел, осложненных разрывными нарушениями, с использованием двухкомпонентной кригинг или сплайн-аппроксимации и специальной трансформации области построения модели, обусловленной геометрией разрывных нарушений. Метод позволяет использовать огромные массивы исходных данных, учитывать наличие разрывных нарушений и естественные ограничения на максимально допустимые значения в строящихся моделях. Построение моделей на геометрически сложных сетках, создаваемых в рамках оптимизационной постановки с минимизацией средней мощности слоя, позволяет воспроизводить сложные геологические ситуации и может эффективно применяться к задачам сейсмостратиграфического анализа.
5. Предложен и апробирован на реальных объектах набор процедур трансформаций числовых моделей геологических поверхностей, адаптированный к особенностям морфологически сложным объектам, и позволяющий выявлять типовые тектонические и геоморфологические формы. Разработаны новые методики к анализу дифференциальных характеристик геологических поверхностей и оценке их похожести на простые типовые формы. Изучение форм геологических поверхностей с помощью вращающихся палеток, позволяет обнаруживать детали и особенности строения

геологических объектов, которые не различимы на привычных моделях. Данный метод позволяет выделять амплитудные и малоамплитудные разрывы.

Важнейшим *прикладным результатом диссертации* является созданный на базе разработанных методик моделирования геологических объектов набор компьютерных программ, который был широко использован при построении геолого-геофизических моделей нефтегазоносных районов Сибири на основе данных 2D/3D сейсморазведки и результатов бурения.

#### **Перспективы дальнейшей разработки темы.**

1. В плане развития корреляционных методов представляет интерес практическая реализация корреляции разрезов скважин на основе оптимизационных алгоритмов с контролем получаемых результатов по палеонтологическим керновым данным. Такая возможность теоретически рассмотрена автором.
2. Также, интерес представляет совместное использование в корреляционных построениях ГИС и МОГТ данных при качественном совмещении временных и глубинных разрезов.
3. Большие перспективы представляет развитие исследований по созданию и использованию обобщенных каротажных образов скважин для разных нефтегазоносных провинций, областей и районов и для разных стратиграфических уровней.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алберг, Дж. Теория сплайнов и ее приложения / Дж. Алберг, Э. Нильсон, Дж. Уолш. - М.: Мир, 1972. - 320 с.
2. Ашкеназы, В.О. Сплайн-поверхности. Основы теории и вычислительные алгоритмы. / В.О. Ашкеназы - Тверской государственный университет. Тверь 2003, - 82 с.
3. Афанасьев, С.А. Задачи прогноза и оптимизации при разведке месторождений нефти и газа / С.А. Афанасьев, В.О. Красавчиков - Новосибирск: Наука, 1986. - 133 с.
4. Бадамшин, Э.З. Сопоставление геофизических разрезов скважин с помощью корреляционных графиков. / Э.З. Бадамшин, М.И. Овчинникова, Р.А. Чабдарова // РНТС. ВНИИОЭНГ. Сер. Нефтегаз. геол. и геофиз. М., 1979, № 3, - С. 26-30.
5. Бадьянов, В.А. Методика детального расчленения и корреляции неоднородных продуктивных горизонтов / В.А. Бадьянов // Применение математических методов при обработке материалов нефтепромысловой геологии. – Тюмень. – 1972. – С. 3-15.
6. Брадучан, Ю.В. Баженовский горизонт Западной Сибири (стратиграфия, палеогеография, экосистема, нефтеносность) / Ю.В. Брадучан, Ф.Г. Гурари, В.А. Захаров и др. - Новосибирск: Наука, 1986. – 217 с.
7. Безруков, А.В. Проблема пространственной связности фациальных тел в 3D геологических моделях / А.В. Безруков, В.И. Савичев, А.Р. Мухарлямов // Научно–технический вестник ОАО «НК «Роснефть». - 2009. - № 2. - С. 4-7.
8. Белкина, В.А. Алгоритм отыскания критических путей для анализа линейных участков корреляционного графа / Белкина В.А. // Обработка данных сейсморазведки на ЭВМ. Тр. ЗапСибНИГНИ. – Вып. 72. – Тюмень. – 1974. – С. 132-135.
9. Беллман, Р. Динамическое программирование / Р. Беллман. – М.: ИЛ. - 1960. – 400 с.

10. Белонин, М.Д. Геометрические свойства поверхностей Александровского поднятия Куйбышевской области / М.Д. Белонин, И.М. Жуков // Вопросы математической геологии. Л., Наука. – 1968. – С. 194-207.
11. Бердов, В.А. Выделение пластов межскважинного пространства по данным каротажа в программном комплексе Petrel / В.А. Бердов, А.А.
12. Власов, В.В. Лапковский // ГЕО-Сибирь-2012. Т.2. Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых: сборник материалов VIII Международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2012». – Новосибирск, 2012. - С. 80-84.
13. Билибин, С.И. Трехмерная геологическая модель - обязательный этап изучения нефтегазового месторождения / С.И. Билибин // Вестник ЦКР Роснедра. - 2009. – №3. – Научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа (Москва). - С. 22-29.
14. Болотова, И.Л. Опыт информационно-технологического обеспечения решения геологических задач стратиграфическими данными [Электронный ресурс] / И.Л. Болотова, В.Ф. Гришкевич, Л.А. Колосова, С.В. Лагутина, С.А. Предин, Е.В. Рыбьякова // Вестник недропользователя Ханты-Мансийского автономного округа. – 2003. – 12. – Режим доступа: <http://www.oilnews.ru/12-12/opyt-informacionno-texnologicheskogo-obespecheniya-resheniya-geologicheskix-zadach-stratigraficheskimi-dannymi/>, свободный.
15. Бурлаков Н.С. Математическое, алгоритмическое и программное обеспечение для идентификации структурных объектов по комплексу разнородных геолого-геофизических данных. / Бурлаков Н.С. - Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2014, 243 с. [https://gubkin.ru/diss2/files/Burlakov\\_Dissertation.zip](https://gubkin.ru/diss2/files/Burlakov_Dissertation.zip)
16. Быков, А.В. Использование нечетких множеств при решении задач стратиграфии [Электронный ресурс] / Быков А.В. // Вестник кибернетики. – 2009. – № 8 (1). – зарегистрировано 01.06.2009 под

- номером                      Режим                      доступа:                      0420900055/0005,  
[http://www.ipdn.ru/rics/vk/\\_private/vk8/32-40.pdf](http://www.ipdn.ru/rics/vk/_private/vk8/32-40.pdf), свободный.
17. Справочник по нефтепромысловой геологии / Н.Е. Быков, А.Я. Фурсов, М.И. Максимов и др. - М.: Недра, 1984. – 529 с.
  18. Вайнберг, Я.М. Марковская модель в задаче корреляции разрезов / Я.М. Вайнберг, М.Ю. Ловская // Математические методы анализа цикличности в геологии. - М.: – 1989. – С. 31-36.
  19. Василенко, В.А. Сплаины: теория, алгоритмы, программы / В.А. Василенко // Новосибирск: Наука, 1983. - 214 с.
  20. Вассоевич, Н.Б. Флиш и методика его изучения. / Н.Б. Вассоевич - М.: Гостоптехиздат, 1948. - 216 с.
  21. Вассоевич, Н.Б. Уточнение понятий и терминов, связанных с осадочными циклами, стадийностью литогенеза и нефтеобразования / Н.Б. Вассоевич // Основные теоретические вопросы цикличности седиментогенеза - М.: Наука, 1977. - С. 34-58.
  22. Верхотурова, О.М. Система выделения 3D объектов на основе дискретных данных / О.М. Верхотурова // Вестник УГТУ. - Уфа, 2009. - т. 12. - № 1. - С. 180-187.
  23. Вистелиус, А.Б. Основы математической геологии / А.Б. Вистелиус - Л.: Наука, 1980. - 392 с.
  24. Вистелиус, А.Б. Красноцветные отложения полуострова Челекен (литостратиграфия и геологическое строение) / А.Б. Вистелиус, М.А. Романова - Москва-Ленинград, 1962. - изд.-во АН СССР. - 227 с.
  25. Видякин, В.В. Компьютерное моделирование геологического строения и процесса разработки нефтяного месторождения / В.В. Видякин, Д.М. Волков, Д.Н. Воронков, В.А. Галактионов, А.А. Клевченя, Д.Е. Шевченко - М.: Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша, 2009. - № 56. - 25 с.
  26. Вознюк, А.В. Факты, только факты: к проблеме реконструкции истории и о ее циклическом характере [Электронный ресурс]. / А.В. Вознюк                      //                      Режим                      доступа                      :  
<http://www.trinitas.ru/rus/doc/0211/002a/1100-vzn.pdf>, свободный.

27. Волков, А.М. Выделение пластов в разрезе и их предварительная корреляция. / А.М. Волков // В кн.: Методы обработки информации о залежах нефти и газа на ЭВМ. Тр. ЗваСибНИГНИ, 1971. - вып. - 45. - С. 125-139.
28. Волков, А.М. Параметризация складок / А.М. Волков // НТС «Нефть и газ Тюмени». - вып. 13. - Тюмень. - 1972. - С. - 58-60.
29. Волков, А.М. Выделение реперов в разрезе путем выбора оптимального варианта корреляции / А.М. Волков, А.П. Пермьяков, В.А. Солдатов // НТС «Проблемы нефти и газа Тюмени». - вып. 24. - Тюмень, 1974. - С. - 71-74.
30. Волков, А.М. Решение практических задач геологии на ЭВМ / А.М. Волков - М.: Недра, 1980. - 223 с.
31. Волков, А.М. Геологическое картирование нефтегазоносных территорий с помощью ЭВМ / А.М. Волков - М.: Недра, 1988. - 222с.
32. Волков, В.А. Моделирование геологического строения объектов, осложненных нарушениями с наклонными плоскостями сместителей / В.А. Волков, С.Е. Гребенников, А.П. Лобасов, и др. - М.: ВИЭМС, 1985. - Вып. 9. - 7 с.
33. Волкова, М.С. Алгоритм построения четырехугольных нерегулярных сеток для геологических моделей с разрывными нарушениями / М.С. Волкова // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. - 2006. - № 2. - С. 52-59.
34. Воронин, Ю.А. Методологические вопросы применения математических методов в геологии / Ю.А. Воронин, Э.А. Еганов - АН СССР. - СО. - Вычислит. центр. – Новосибирск.: Наука, 1974. - 86 с.
35. Воронин, Ю.А. Геология и математика / Ю.А. Воронин, Б. К. Алабин, С.В. Гольдин и др. – Новосибирск.: Наука, 1967. - 254 с.
36. Гик, Л.Д. Измерение коэффициента пористости по данным декремента затухания / Л.Д. Гик // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2008. - №4. – С. 38-41.

37. Гик, Л.Д. Обнаружение зон повышенной пористости по изменению спектральных характеристик сейсмического волнового поля / Л.Д. Гик, В.А. Конторович, М.С. Канаков, В.В. Лапковский, Б.В. Лунев, М.М. Немирович-Данченко // Гео-Сибирь-2012: VIII Международная конференция "Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых" (Новосибирск, 10-20 апреля 2012 г.). - Новосибирск: СГГА, 2012. - Т. 2. - С. 66-70.
38. Гилмор, Р. Прикладная теория катастроф. / Р. Гилмор - М.: Мир, 1984. - том 1. - 350 с.
39. Гладенков, Ю.Б. Сейсмостратиграфия и ее развитие в Советском Союзе (основные направления и перспективы) / Ю.Б. Гладенков, Н.Я. Кунин, А.Е. Шлезингер // Изд. АН СССР. - Сер. геол. - 1984. - № 4. - С. 3-20.
40. Гладенков, Ю.Б. Теория и практика стратиграфии / Ю.Б. Гладенков // Стратиграфия. Геологическая корреляция. - 2003. - Т. 11, № 5. - С. 123-128.
41. Гладков, Е.А. Геологическое и гидродинамическое моделирование месторождений нефти и газа / Е.А. Гладков – Томск.: 2012, изд-во Томского политехнического университета. - 99 с.
42. Глебов, А.Ф. Площадное сглаживание сейсмических параметров, полученных по системе произвольно расположенных профилей / А.Ф. Глебов // Геология и геофизика. - 1995. - № 9. - С. 117-128.
43. Глебов, А.Ф. Геолого-математическое моделирования нефтяного резервуара: от сеймики до геофлюидодинамики / А.Ф. Глебов - М.: Научный мир, 2006. - 344 с.
44. Глинский, Б.М. Численное моделирование распространения упругих волн в кавернозных средах / Б.М. Глинский, Д.А. Караваев, В.Н. Мартынов, М.С. Хайретдинов // Вестник НЯЦ РК. - выпуск 3, 2010. - С. 96–100.
45. Глушкова, Т.А. Технология совместного применения ГИС и экспресс-геохимии для поисков и прогнозирования медного оруденения / Т.А.

- Глушкова, О.Л. Лефтон, А.Г. Талалай, И.Е. Шинкарюк // Успехи современного естествознания. - № 9. - 2016. - С. 112-116.
46. Голикова, Г.В. Численные исследования интерференционных волновых полей в слоистых средах, содержащих границы разделов с контактом проскальзывания / Г.В. Голикова, А.А. Ковтун, В.В. Решетников // Вопросы геофизики. Выпуск 39. - 2006. – СПб. - С. 20-37.
47. Гольденберг, Л.М. Цифровая обработка сигналов / Л. М. Гольденберг, Б.Д. Матюшкин, М.Н. Поляк // Справочник. — М.: Радио и связь, 1985. — 312 с.
48. Гольдин, С.В. Линейные модели при анализе структурных взаимоотношений. / С.В. Гольдин // Методы обработки информации о залежах нефти и газа на ЭВМ. - Тр. ЗваСибНИГНИ, 1971. – вып. 45. – С. 104-124.
49. Гришкевич, В.Ф. Формальная постановка задачи детальной литолого-стратиграфической корреляции / В.Ф. Гришкевич // НТС «Проблемы нефти и газа Тюмени». - Тюмень, 1974. - № 23. - С. 82-84.
50. Гришкевич, В.Ф. Зона неопределенности в задачах стратиграфической параллелизации отложений. / В.Ф. Гришкевич // «Геология и геофизика», 1982.—№ 1. - С. 70—76.
51. Гришкевич, В.Ф. Изложение задачи корреляции большого числа скважин в терминах теории расчлененных алгоритмов / В.Ф. Гришкевич // Методы математического моделирования при решении прикладных задач нефтяной геологии. Тр. ЗапСибНИГНИ. – Вып. 192. – Тюмень, 1984. - С. 15-19.
52. Гришкевич, В.Ф. Неоднозначность стратиграфической модели толщи как фактор опоискования / В.Ф. Гришкевич // Вестник недропользователя ХМАО, Ханты-Мансийск, 1999. - № 3. - С. 73-75.
53. Гришкевич, В.Ф. Разработка метода детальной корреляции и выделения проницаемых комплексов в терригенных отложениях (на примере неокомских отложений Среднего Приобья). Диссертация на

- соискание ученой степени кандидата геол.-минер. 04.0017 наук / В.Ф. Гришкевич // Тюмень, 1977. - 134 с.
54. Грузман, И.С. Математические задачи компьютерной томографии / И.С. Грузман // Соросовский образовательный журнал, 2001. - №5. - С. 117-121.
55. Губерман, Ш.А. Алгоритм корреляции [Электронный ресурс]. / Ш.А. Губерман // Режим доступа <http://www.mygeos.com/2010/09/14/algorithm-korrelyacii>, свободный.
56. Губерман, Ш.А. О машинной корреляции пластов в разрезе скважин по геофизическим данным. / Ш.А. Губерман, М.И. Овчинникова // Известия Академии наук СССР. – Сер. «Физика Земли», 1972. - № 3. - С. 87-94.
57. Губерман Ш.А. Неформальный анализ данных в геологии и геофизике / Губерман Ш.А. – М. : Недра, 1987. – 261 с.
58. Гусев, В.А. Совместная аппроксимация сложных и разрывных геологических поверхностей / В.А. Гусев // Экспресс-информация ВИЭМС. Сер. «Математические методы исследований в геологии» - 1983. – Вып. 9. - С. 1-14.
59. Гурари, Ф.Г. Геология и перспективы нефтегазоносности Обь-Иртышского междуречья / Ф.Г. Гурари. - Л.: Гостоптехиздат, 1959. - 174 с.
60. Гурари, Ф.Г. О поисках нефти и газа в мезозое Западно-Сибирской низменности / Ф.Г. Гурари // Л.: Гостоптехиздат, 1961. (Тр. СНИИГГиМСа; Вып. 17). - С.15–31.
61. Гурари Ф.Г. Строение и условия образования клиноформ неоконских отложений Западно-Сибирской плиты (история становления представлений) / Ф.Г. Гурари. – Новосибирск. – СНИИГГиМС. – 2003. – 141 с.
62. Гурари, Ф.Г. Литолого-геохимические факторы формирования и размещения залежей нефти в мезозойских отложениях Западно-Сибирской плиты / Ф.Г. Гурари, Г.Н. Гурова, В.П. Казаринов и др. //

- Материалы по литологии и геохимии нефтегазоносных бассейнов Сибири. – Новосибирск, 1968. - С. 5-10.
63. Гутман, И.С. Описание программы автоматической корреляции месторождений “AutoCorr” / И.С. Гутман, В.М. Староверов – М.: 2000. – 224 с.
64. Гутман, И.С. Отечественный комплекс «AutoCorr» для выполнения корреляции разрезов скважин в автоматическом и полуавтоматическом режимах, моделирования залежей, подсчета запасов УВ и проектирования разработки / И.С. Гутман, И.Ю. Балабан, Г.П. Кузнецова и др. // Вестник ЦКР Роснедра, № 2. - 2005. – С. 51-62.
65. Гутман, И.С. Моделирование залежей углеводородов. Корреляция разрезов скважин в автоматическом и полуавтоматическом режиме с помощью программы "AutoCorr" / И.С. Гутман, И.Ю. Балабан, Г.П. Кузнецова, В.М. Староверов // SPE, 2006. - 9 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа [http://www.autocorr.stargeo.ru/autocorr/Art2006\\_10.pdf](http://www.autocorr.stargeo.ru/autocorr/Art2006_10.pdf), свободный.
66. Гутман, И.С. Программный комплекс ACDV для изучения осадконакопления в залежах углеводородов сложного геологического строения. / И.С. Гутман, И.Ю. Балабан, О.В. Постнова, М.И. Саакян // Геофизика, № 4. - 2010. - С. 17-25.
67. Гутман, И.С. Методические рекомендации к корреляции разрезов скважин. / ред. И.С. Гутман. - М.: «Издательский дом недр», 2013. - 112 с.
68. Демьянов, В.В. Геостатистика. Теория и практика. / В.В. Демьянов, Е.А. Савельева – Москва: «Наука», 2010. - 327 с.
69. Динамика экосистем Новосибирского Академгородка / отв. ред. И.Ф. Жимулёв. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. - 438 с.
70. Дюблор, О., Использование геостатистики для включения в геологическую модель сейсмических данных / О. Дюблор. – 2002. EAGE. - 296 с.



71. Ершов, С.В. Компьютерное моделирование геологического строения клиноформного комплекса неокома северных и арктических районов Западной Сибири / С.В. Ершов, Г.Ф. Букреева, В.О. Красавчиков // Геол. и геофиз. - 2009. - Т. 50, № 9. - С. 1035-1048.
72. Жаксыбеков, А.Е. Построение цифровых трехмерных геологических моделей юрских продуктивных горизонтов месторождения Узень / А.Е. Жаксыбеков, Л.И. Котовская, А.С. Лаврик // Каротажник, 2005. - С. 51-61.
73. Жековский, Б. Новый метод стратиграфической корреляции / Б. Жековский // Экспресс-информация «Нефтепромысловое дело», ВИНТИ. – М.: 1963, № 31. - реферат №135. - С. 22-27.
74. Жемчужников, Ю.А. Цикличность строения угленосных толщ, периодичность осадконакопления и методы их изучения / Ю. А. Жемчужников // Тр. Ин-т геол. наук АН СССР, вып. 90, угольн. сер. (№ 2), 1947. - С. 7-18.
75. Жемжурова, З.Н. Практикум по геолого-геофизическому моделированию разрабатываемых залежей нефти и газа / З.Н. Жемжурова, В.А. Чекунова, В.Н. Черноглазов // Учебное пособие. - М.: Издательский центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2012. - 206 с.
76. Жемчужников, Ю.А. Периодичность осадконакопления и понятия ритмичности и цикличности / Ю.А. Жемчужников // Бюл. МОИП. Отд. геол. 1955. - т. 30. - вып. 3. - С. 74-76.
77. Закревский, К.Е. Геологическое 3D моделирование. / К.Е. Закревский - М.: ООО ИПЦ "Маска". - 376 с.
78. Зубков, М.Ю. Особенности распределения урана в битуминозных отложениях баженовской свиты (Западная Сибирь) / М.Ю. Зубков // Каротажник, 2015. - № 5. – С. 3-32.
79. Игнатов, М.И. Натуральные сплайны многих переменных / М.И. Игнатов, А.Б. Певный. – Ленинград: Наука, 1991. - 125 с.
80. Икон, Е.В. Закономерности изменения коллекторских свойств пород неокома с глубиной их залегания во фроловской мегавпадине / Е.В.

- Икон, В.И. Конюхов, М.Л. Мороз // Вестник недропользователя №20/2009. [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.oilnews.ru/20-20/zakonomernosti-izmeneniya-kollektorskix-svoystv-porod-neokoma-s-glubinoj-ix-zaleganiya-vo-frolovskoj-megavradine/>, свободный.
81. Казаринов, В.П. Мезозойские и кайнозойские отложения Западной Сибири / В.П. Казаринов – М.: Гостоптехиздат, 1958. - 324 с.
82. Калицкий, К.П. В какую фазу геологического цикла происходит образование нефтяных залежей / К.П. Калицкий. - Петроград, 1916. - 78 с.
83. Калицкий, К.П. Подземное картирование / К.П. Калицкий. - Л.: Государственное научно-техническое нефтяное издательство, 1933. - 131 с.
84. Канакова, К.И. Модель геологического строения и прогноз нефтегазоносности палеозойских отложений Останинской, Северо-Останинской площадей (юго-восток Западной Сибири, Томская область). / К.И. Канакова, И.А. Губин // Геология нефти и газа, 2011. - № 5. - С. 26-38.
85. Канарейкин Б.А. Построение структурных карт для гетерогенных складчатых моделей на ЭВМ / Б.А. Канарейкин, В.В. Лапковский, В.Ф. Свиньин // Геология и геофизика, 1984. - № 4. - С. 88-98.
86. Канарейкин, Б.А. Автоматизирование построения структурных карт для доюрских образований Западно-Сибирской плиты по данным сейсморазведки МОГТ / Б.А. Канарейкин, В.В. Лапковский, А.И. Мальцев // Геология и геофизика, 1988. - № 2. - С. 81-91.
87. Каневский, М.Ф. Элементарное введение в геостатистику / М.Ф. Каневский, В.В. Демьянов, Е.Е. Савельева, С.Ю. Чернов, В.А. Тимонин // Серия: Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. - № 11. – Москва, ВИНТИ, 1999.
88. Карапетов, А.М. Роль карты схождения в изучении тектоники глубинных структурных форм / А.М. Карапетов // Изв. высших учебн. Заведений. Нефть и газ, 1958. - вып. 2. - С.13-18.

89. Карогодин, Ю.Н. Ритмичность осадконакопления и нефтегазоносность / Ю.Н. Карогодин. - М.: Недра, 1974. - 176 с.
90. Карогодин, Ю.Н. Понятийно-терминологическая база седиментационной цикличности / Ю.Н. Карогодин. - Теоретические исследования по терминологии и седиментационной цикличности. Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1978. - 218 с.
91. Карогодин, Ю.Н. Седиментационная цикличность / Ю.Н. Карогодин – М.: Недра, 1980. - 242 с.
92. Карогодин, Ю.Н. Введение в нефтяную литмологию / Ю.Н. Карогодин. – Новосибирск: Наука, 1990. - 240 с.
93. Карогодин, Ю.Н. Анализ основных понятий и терминов литмологии и сиквенс-стратиграфии. / Ю.Н. Карогодин, Дж. Арментроуз // Геология и геофизика, 1996. - т. 37. - № 7. - С. 3-10.
94. Кашик, А. Новые технологии при построении цифровых геологических моделей месторождений углеводородов [Электронный ресурс]. / А. Кашик, С. Билибин, Г. Гогоненков, С. Кириллов // Технологии ТЭК. - № 6. – 2003. Режим доступа: [http://www.oilcapital.ru/edition/technik/archives/technik/technik\\_03\\_2003/63345/public/63377.shtml](http://www.oilcapital.ru/edition/technik/archives/technik/technik_03_2003/63345/public/63377.shtml), свободный.
95. Кашик, А.С. Объединенная автоматизированная технология корреляции скважин по данным ГИС / А.С. Кашик, Г.Н. Гогоненков, М.В. Перепечкин, Е.В. Ковалевский, И.С. Гутман, И.Ю. Балабан, Г.П. Кузнецова, В.М. Староверов // 4-ая международная конференция и выставка «К новым открытиям через интеграцию геонаук». – Россия: г. Санкт-Петербург 05 – 08 апреля 2010 г.
96. Квасов, Б.И. Методы изометрической аппроксимации сплайнами. / Б.И. Квасов - РХД, 2006. - 416 с.
97. Кириллов, С.А. Информационно-аналитическая система для четырехмерного моделирования залежей углеводородов по комплексу сейсмических и скважинных данных / С.А. Кириллов - М.: 2011. - 176 с.

98. Киричкова, А.И. Стратиграфия в нефтяной геологии: методология исследований и актуальные проблемы / А.И. Киричкова, В.А. Чижова, Э.К. Сташкова, Н.К. Фортунатова, Б.Н. Шурыгин // Нефтегазовая геология, теория и практика. 2007 (2). - С.1-32.
99. Ковалевский, Е.В. Уточнение геологических моделей посредством использования автоматической корреляции скважин / Е.В. Ковалевский, Г.Н. Гогоненков, М.В. Перепечкин // Недропользование XXI век, 2007. - №4. - С. 28-31.
100. Ковалевский, Е.В. Автоматическая корреляция скважин на основе формализации неопределенности. [Электронный ресурс] / Е.В. Ковалевский, Г.Н. Гогоненков, М.В. Перепечкин [www.cgeo.ru/avtocorr/](http://www.cgeo.ru/avtocorr/). Режим доступа, свободный. 12 апреля, 2018.
101. Ковалков, А.В. О приближенном вычислении сплайна с непрерывными ограничениями типа неравенств / А.В. Ковалков // В сб.: Вычислительные алгоритмы в задачах математической физики. Новосибирск, 1983. - С. 78-86.
102. Колесов, В.В. Принципы технологии многомерной интерпретации / В.В. Колесов // Геофизика, 2004. - спец. выпуск. - С. 7-11.
103. Колесов, В.В. Геометризация маломощных песчаных тел по данным 2-3 скважин и сейсморазведки (на примере юрских и неокомских отложений Западной Сибири) / Колесов, В.В., Смирнов О.А. // Геофизика, 2004, спец. выпуск, с. 101-106.
104. Конторович, А.Э. Органическая геохимия мезозойских нефтегазоносных отложений Сибири / А.Э. Конторович, И.Д. Полякова, О.Ф. Стасова и др. - М.: Недра, 1974. - 189 с.
105. Конторович, А.Э. Геология нефти и газа Западной Сибири / А.Э. Конторович, И.И. Нестеров, Ф.К. Салманов и др. - М.: Недра, 1975. - 680 с.
106. Конторович, А.Э. Нефтематеринские формации Западной Сибири: старое и новое видение проблемы / А.Э. Конторович, В.П. Данилова, Е.А. Костырева, и др. // Органическая геохимия

- нефтепроизводящих пород Западной Сибири. Новосибирск: Издательство СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1999. - С. 10 – 12.
107. Конторович, А.Э. Баженовская свита - главный источник ресурсов нетрадиционной нефти в России. [Электронный ресурс] / А.Э. Конторович, Л.М. Бурштейн, В.А. Казаненков, В.А. Конторович, Е.А. Костырева, Е.В. Пономарева, С.В. Рыжкова, П.А. Ян // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. Электронный журнал, 2014. - № 2 (10). - С. 1-8.
108. Конторович, В.А. Тектоника и нефтегазоносность мезозойско-кайнозойских отложений юго-восточных районов Западной Сибири / В.А. Конторович - Новосибирск: Изд. СО РАН, филиал «ГЕО», 2002. - 253 с.
109. Конторович, В.А. Сейсмогеологические адаптивные методы прогноза качества коллекторов и подготовки сложно построенных ловушек нефти и газа в верхней юре центральных и южных районов Западной Сибири (горизонт Ю1 васюганской свиты) / В.А. Конторович, С.А. Бердникова, Л.М. Калинина, А.А. Поляков // Геология и геофизика, 2004. - т. 45. - № 1. - С. 79-90.
110. Конторович, В.А. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности келловей-волжских отложений Чузикско-Чижапской зоны нефтегазонакопления / В.А. Конторович, С.А. Бердникова, Л.М. Калинина, В.В. Лапковский, А.А. Поляков, М.В. Соловьев // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. - №1, 2006а. - С. 4-11.
111. Конторович, В.А. Модель геологического строения и нефтегазоносность зоны контакта палеозойских и мезозойских отложений в Чузикско-Чижапской зоне нефтегазонакопления / В.А. Конторович, С.А. Бердникова, Л.М. Калинина, В.В. Лапковский, А.А. Поляков, М.В. Соловьев // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. - №5-6, 2006б. - С. 91-102.
112. Конторович, В.А. Сейсмогеологические критерии нефтегазоносности зоны контакта палеозойских и мезозойских

- отложений Западной Сибири (на примере Чузикско-Чижапской зоны нефтегазонакопления) / В.А. Конторович // Геология и геофизика, 2007. - т. 48. - № 5. - С. 538-547.
113. Конторович, В.А. W-SEIS - отечественный пакет комплексной интерпретации геолого-геофизических материалов при решении задач нефтяной геологии. 8-й Петербургский международный форум ТЭК. / В.А. Конторович, В.В. Лапковский // Конференция «Инвестиции и инновации в ТЭК». - Санкт-Петербург: 8-10 апреля, 2008. - С. 30-31.
114. Конторович, В.А. Тектоника и нефтегазоносность центральной части Александровского свода / В.А. Конторович, Л.М. Калинина, В.В. Лапковский, М.В. Соловьев, А.Н. Бахарев // Геология нефти и газа, 2011. - № 5. - С. 119-127.
115. Конторович, В.А. Пакет программ предназначен для интерпретации данных сейсморазведки и бурения W-seis. / В.А. Конторович, В.В. Лапковский // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011610211, дата регистрации в Реестре программ для ЭВМ 11.01.2011г.
116. Конторович, В.А. Программа предназначена для вычисления запасов нефти, газа и попутных полезных компонентов в соответствии с отраслевой классификацией запасов Estimo. / В.А. Конторович, В.В. Лапковский // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011611994, дата регистрации в Реестре программ для ЭВМ 18.05.2011г.
117. Конторович, В.А. Автокаталитическое всплывание газонасыщенных пород, как механизм формирования бескорневых структур осадочного чехла и связанных с ними крупных газовых месторождений / В.А. Конторович, И.Д. Кожемякин, В.В. Лапковский, Б.В. Лунёв // ГЕО-Сибирь-2013. - Т.2. Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых: сборник материалов IX Международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2013». – Новосибирск, 2013.

118. Конторович, В.А. Структурно-тектоническая характеристика и модель геологического строения неопротерозойско-фанерозойских отложений Анабаро-Ленской зоны / В.А. Конторович, А.Э. Конторович, И.А. Губин, А.М. Зотеев, В.В. Лапковский, Н.А. Малышев, М.В. Соловьев, Г.С. Фрадкин // Геология и геофизика, 2013. - т.54. - № 8. - специальный выпуск «Проблемы геологии и нефтегазоносности Арктики». - С.1253-1274.
119. Конторович, В.А. Автокаталитическое всплывание газонасыщенных пород как механизм формирования ловушек для уникальных газовых месторождений на севере Западной Сибири / В.А. Конторович, И.Д. Кожемякин, В.В. Лапковский, Б.В. Лунёв // Геология нефти и газа, 2014а. – № 1. - С. 50-57.
120. Конторович, В.А. Модель формирования неокомского клиноформного комплекса Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции с учетом изостазии / В.А. Конторович, В.В. Лапковский, Б.В. Лунёв // Геология нефти и газа, 2014б. - № 1. - С.65-72.
121. Конторович, В.А. Программы построения и редактирования прямоугольных моделей двумерных геолого-геофизических полей по данным. GridBuilder-GridMaster / В.А. Конторович, В.В. Лапковский // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014698109, дата регистрации в Реестре программ для ЭВМ 17.07.2014г.
122. Котельников, В.А. О пропускной способности "эфира" и проволоки в электросвязи / В.А. Котельников // Успехи физических наук: Журнал. — 2006. — № 7. — С. 762-770, репринт статьи 1933 года. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.mathnet.ru/links/839ea350d25d963140a7dd07b2f2811c/ufn343.pdf> , свободный.
123. Красавчиков, В.О. Комплексная интерпретация слабосогласованных геолого-геофизических данных при построении региональных структурных карт (на примере осадочного чехла

- Западно-Сибирской плиты) / В.О. Красавчиков // Геология и геофизика, 2002. – Т. 43. – № 5. - С. 456-469.
124. Криге, Д.Г. Обзор некоторых геостатистических моделей для оценки золотоносных руд в Южной Африке / Д.Г. Криге // В кн.: Исследования по математической геологии. - Л., 1978. - С.124-133.
125. Крутнов, В.Н. Аналог интерполяционного метода крайгинга без геостатистического обоснования / В.Н. Крутнов, М.В. Дмитриевский // Вестник ТюмГУ. - №3. – Тюмень, 2001. - С. 208-216.
126. Кулагин, А.В. Моделирование геологических процессов при интерпретации геофизических данных / А.В. Кулагин, И.А. Мушин, Т.Ю. Павлова - М.: Недра, 1994. - 250 с.
127. Кулахметов, Н.Х. Особенности корреляции шельфовых отложений неокома Среднего Приобья с использованием сейсморазведки МОВ ОГТ / Н.Х. Кулахметов, В.М. Никитин, Г.С. Ясович, Ю.И. Валицкий // Геология нефти и газа, 1983. - № 5. - С.44-48.
128. Ландау, Л.Д. Теория упругости / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц - М.: Наука, 1965. – 204 с.
129. Лапковский, В.В. Использование цифровой обработки углов падения слоев для выделения и описания пликативных структур / В.В. Лапковский // Геология и геофизика, 1983. - № 2. - С. 25-31.
130. Лапковский, В.В. Метод интерполяции данных геолого-геофизических наблюдений с учетом анизотропии двумерных слоистых сред / В.В. Лапковский // В кн. Геолого-геофизические исследования в Сибири. - Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР. - 13.09.1984. - № 6223-84.
131. Лапковский, В.В. Автоматизированное стереоизображение опрокинутых складок / В.В. Лапковский, С.А. Серебряный // Геология и геофизика, 1986. - № 9. - С. 126-131.
132. Лапковский, В.В. Математические модели залежей Верхнечонского месторождения. Геология и методика разведки месторождений нефти и газа Сибирской платформы. / В.В.



- Лапковский, П.Н. Мельников // Новосибирск: СНИИГГиМС, 1988. - С. 77-88.
133. Лапковский, В.В. Аппроксимация и преобразование геологических поверхностей, осложненных разрывами / В.В. Лапковский // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений, 2004. - № 1. - С. 130-135.
134. Лапковский, В.В. Следует ли игнорировать отметки пластопересечений в наклонных скважинах при моделировании поверхностей слоев? / В.В. Лапковский // В кн.: Использование нейронных сетей для интерпретации данных нефтепоискового комплекса ГГХМ Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. - С. 88-92.
135. Лапковский, В.В. Межскважинная корреляция пластов как задача восстановления многомерной функции по ее проекциям [Электронный ресурс]. / В.В. Лапковский // Материалы конференции «Геомодель 2010». - Геленджик, 13 - 17 сентября 2010. – 5 с. электрон. опт. диск (CD-ROM).
136. Лапковский, В.В. Непрерывная сейсмостратиграфическая модель как основа структурной интерпретации разрезов МОГТ / В.В. Лапковский // Технологии сейсморазведки, 2012. - № 4. - С. 33-39.
137. Лапковский, В.В. Построение сеточных моделей сложнодислоцированных осадочных толщ / В.В. Лапковский // Геология нефти и газа, 2014а. - № 1. - С. 22-26.
138. Лапковский, В.В. О геологических основах автоматической корреляции разрезов скважин / В.В. Лапковский, А.В. Истомин, В.А. Конторович // сборник «Актуальные проблемы петрофизики сложнопостроенных коллекторов», 2014б. - EAGE. - С. 310-317.
139. Лапковский, В.В. Патент на изобретение № 2516590. Способ построения непрерывных сейсмостратиграфических моделей разрезов/кубов, приоритет 11.12.2012, зарегистрирован 24.03.2014.
140. Лапковский, В.В. Корреляция разрезов скважин как многомерная оптимизационная задача / В.В. Лапковский, А.В.

- Истомин, В.А. Конторович, В.А. Бердов // Геология и геофизика, 2015. - том 56. -С. 624-630.
141. Лапковский, Обобщенный образ скважины по каротажным данным: технология создания и применения [Электронный ресурс]/ В.В. Лапковский, Н.Е. Шмелев, Б.В. Лунев // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2018. – Т. 13. – № 2, 17 с.
142. Лисицын, П.А. Лавинная седиментация и перерывы в осадконакоплении в морях и океанах / П.А. Лисицын - М.: Наука, 1988. - 309 с.
143. Локк, К.Э. Компьютерные методы суммирования изображений. Обобщенный и усредненный портреты / К.Э. Локк // Вестник Московского университета. - Серия XXIII Антропология, 2011. - № 1. - С. 37–44.
144. Лосев, А.Ф. Аристотель: Жизнь и смысл. (Серия «Люди. Время. Идеи»). / А.Ф. Лосев, А.А. Тахо-Годи. - М.: Дет. лит., 1982. - 286 с.
145. Лосев, А.Ф. Платон. Аристотель. / А.Ф. Лосев, А.А. Тахо-Годи. — Москва: Молодая гвардия, 2005. — 392 с.
146. Лунёв, Б.В. Изостазия как динамическое равновесие вязкой жидкости / Б.В. Лунёв // Доклады АН СССР, 1986. - т.290. - № 1. - С.72-76.
147. Лунёв, Б.В. О природе верхнемантийной аномалии плотности под Срединно-Атлантическим хребтом и ее роли в рифтогенезе и спрединге / Б.В. Лунёв // Геология и геофизика, 1996. - т.37. - № 9. - С. 87 – 101.
148. Лунёв, Б.В. Развитие инверсионной складчатости в подсолевом комплексе. / Б.В. Лунёв, В.В. Лапковский // [Электронный ресурс]. Материалы конференции «Геомодель 2010». - Геленджик, 13 - 17 сентября 2010. – 3 с.– 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
149. Лунев, Б.В. Быстрое численное моделирование соляной тектоники: возможность оперативного использования в геологической практике / Б.В. Лунев, В.В. Лапковский // Физическая мезомеханика, 2009. - т. 12. - N 1. - С. 63-74.

150. Лунёв, Б.В. Механизм развития инверсионной складчатости в подсолевом комплексе / Б.В. Лунёв, В.В. Лапковский // Физика Земли, 2014. - № 1. - С. 59-65.
151. Лунёв, Б.В. Высокоэффективное 3-d моделирование соляного тектогенеза в целях прогноза структуры подсолевого комплекса / Б.В. Лунёв, Т.В. Абрамов, В.В. Лапковский, В.И. Прийменко // Технологии сейсморазведки, 2017. - № 3.
152. Лурье, М.Б. Технологические особенности создания компьютерной структурно-тектонической модели сложнопостроенного месторождения / М.Б. Лурье, О.А. Смирнов, А.Н. Зайцев // Геофизика, 2004. - Спец. выпуск. - С. 37-40.
153. Лурье, С.Я. Демокрит: Тексты, перевод, исследования. / С.Я. Лурье. - Л.: Наука, 1970. - 664 с.
154. Макаров, В.П. Методологические проблемы научного геологического познания. Российский государственный геологоразведочный университет / В.П. Макаров // Москва, 2010. [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://lithology.ru/node/524>, свободный.
155. Марпл-мл., С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С.Л. Марпл-мл. - М.: Мир, 1990. - 584 с.
156. Матерон, Ж. Основы геостатистики / Ж. Матерон. - М.: Мир, 1968. - 387 с.
157. Маргулис, Л.С. Сиквенстная стратиграфия в изучении осадочных чехлов / Л.С. Маргулис // Нефтегазовая геология, теория и практика, 2008. - (3). - С. 1-26.
158. Мейен, С.В. Введение в теорию стратиграфии / С.В. Мейен. - М.: Наука, 1989. - 216 с.
159. Меленко, С.Г. Эволюция философско-правовых воззрений Платона афинского на формы государственного правления [Электронный ресурс]. / С.Г. Меленко // Режим доступа <http://sibac.info/index.php/2009-07-01-10-21-16/3569-2012-08-14-06-44-30>, свободный.

160. Мерщий, В.В. Применение полно-волнового моделирования для обоснования сейсморазведочных исследований / В.В. Мерщий, О.В. Мерщий // Современные методы сейсморазведки при поисках месторождений нефти и газа в условиях сложнопостроенных структур «Сейсмо-2011». – Украина, Феодосия, 18-24 сентября 2011 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://rutracker.org/forum/viewtopic.php?t=3815599>, свободный.
161. Месторождения // Геофизическое нефтегазоконденсатное месторождение (НГКМ). Neftegazru [Электронный ресурс]. Режим доступа [http://neftegaz.ru/tech\\_library/view/4579](http://neftegaz.ru/tech_library/view/4579), свободный.
162. Методика совместной интерпретации данных сейсморазведки 3D и ГИС в программном комплексе DV-SeisGeo. Руководство пользователя. [Электронный ресурс]. Режим доступа, <http://www.dvseisgeo.ru/Methodics/3D-GIS.htm>, свободный.
163. Митчем, Р.М. Стратиграфическая интерпретация сейсморазрезов МОВ по конфигурации отражений. / Митчем Р.М. мл., Вейл П.Р. и Сангри Дж. Б. - Сейсмическая стратиграфия. Использование при поисках и разведке нефти и газа. Часть 1-2, под редакцией Ч. Пейтона// М.: Мир, 1982 - 846 с.
164. Михайлов, А.Е. Структурная геология и геологическое картирование / А.Е. Михайлов. - М.: Недра, 1984. - 4-е издание. - 464 с.
165. Муклыгин, С.И. Восстановление функции двух переменных по значениям её косых производных в решении некоторых геолого-геофизических задач / С.И. Муклыгин, В.В. Лапковский // Геология и геофизика, 1985. - № 8. - С. 110-113.
166. Мырзак, Е.А. Создание и перспективы развития нового района добычи УВС на Гыданском полуострове (на примере Геофизического месторождения) / Е.А. Мырзак // Горные ведомости, 2013. - № 10. - С. 78-83.
167. Немирович-Данченко, М.М. Численное моделирование трехмерных динамических задач сейсмологии / М.М. Немирович-

- Данченко // Физическая мезомеханика, 2002. – октябрь. - Том 5. - № 5. - С. 99-106.
168. Немирович-Данченко М.М. Возможности обнаружения множественной трещиноватости сплошной среды на основе оценки спектральной плотности энергии отраженного сигнала / М.М. Немирович-Данченко // Физическая мезомеханика, 2013. - № 1. – С. 105-110.
169. Новиков, И.С. Морфотектоника Алтая / И.С. Новиков - Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал “Гео”, 2004. - 313 с.
170. Новокрецин, А.В. Способ устойчивого адаптивного прогноза параметров среды в условиях нестационарной зависимости от априорной информации / А.В. Новокрецин, С.В. Елецкий // Геофизика, 2005. — № 6. — С. 20-22.
171. Новокрецин, А.В. Проблема пространственной неопределённости в задачах структурных построений / А.В. Новокрецин // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений, 2006. — № 10. — С. 68-71.
172. Мясников, В.П. Модели эволюции Земли и планет земной группы / В.П. Мясников, В.Е. Фадеев. - М.: ВИНТИ. - Итоги науки и техники. Физика Земли, 1980. - 232с.
173. Нестеров, И.И. Уплотнение глинистых пород / И.И. Нестеров // Сов. геол., 1965. - № 12. - С. 12-17.
174. Обручев, В.А. Мои путешествия по Сибири / В.А. Обручев. - Издательство Академии Наук СССР. - Москва — Ленинград, 1948. - 276 с.
175. Осокина, Д.Н. Изучение тектонического разрыва как объекта, объединяющего мега-трещину, ее поля (напряжений, деформаций) и вторичные структуры (тектонофизический анализ) / Д.Н. Осокина, Ф.Л. Яковлев, В.Н. Войтенко // Проблемы тектонофизики к 40-летию создания М.В. Гзовским Лаборатории Тектонофизики в ИФЗ РАН. издание ИФЗ РАН, 2008, - С. 89-102.

176. Пангея. MultiLog, 2012. [Электронный ресурс]. Режим доступа [http://pangea.ru/ru/index.php?option=com\\_content&task=view&id=20&Itemid=23](http://pangea.ru/ru/index.php?option=com_content&task=view&id=20&Itemid=23), свободный.
177. Панкратов, А.Н. Поиск протяженных повторов в геномах на основе спектрально-аналитического метода / А.Н. Панкратов, М.И. Пятков, Р.К. Тетуев, Н.Н. Назипова, Ф.Ф. Дедус // Математическая биология и биоинформатика, 2012. - Т. 7. - No2. – С. 476–492. URL: [http://www.matbio.org/2012/Pankratov\\_7\\_476.pdf](http://www.matbio.org/2012/Pankratov_7_476.pdf)
178. Перевозчиков, И.В. Обобщенный фотопортрет: история, методы, результаты. / И.В. Перевозчиков, А.М. Маурер // Вестник Московского университета. Серия XXIII. АНТРОПОЛОГИЯ, 2009. - № 1. - С. 35–44.
179. Пермяков, А.П. Расчленение и корреляция геологических разрезов с помощью ЭВМ. / А.П. Пермяков // Математические методы корреляции разрезов, построения карт и подсчета запасов. Тр. ЗапСибНИГНИ. - Вып. 108. – Тюмень, 1976. – С. 86-105.
180. Постоленко, Г.А. Цикличность рельефообразования. Рельеф и экзогенные процессы гор / Г.А. Постоленко // Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения доктора географических наук, профессора Льва Николаевича Ивановского, Иркутск 25-28 октября 2011. Иркутск Издательство Института географии им. В.В. Сычева СО РАН. - С. 42-44.
181. Плуман, И.И. Распространение урана, тория и калия в отложениях Западно-Сибирской плиты / И.И. Плуман // Геохимия, 1975. - № 5. - С. 756–766.
182. Растегин, А.А. Плотность линеаментов как критерий прогноза нефтегазоносности / А.А. Растегин // Новосибирск: СНИИГГиМС, 1987. - С. 103-109.
183. Роганов, Ю.В. Численное моделирование волновых полей в трещиноватых зонах с поглощением / Ю.В. Роганов, В.Ю. Роганов // Современные методы сейсморазведки при поисках месторождений

- нефти и газа в условиях сложнопостроенных структур «Сейсмо-2011».  
– Украина, Феодосия, 18-24 сентября 2011 г.
184. Роженко, А.И. Теория и алгоритмы вариационной сплайн-аппроксимации / А.И. Роженко. - Новосибирск: ИМВиМГ, 2005. — С. 244.
185. Роженко, А.И. Основные свойства  $\wedge$ -сплайнов и алгоритм их построения на основе эрмитовых конечных элементов / А.И. Роженко // Вычислительные алгоритмы в задачах математической физики. — Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1985. — С. 113-127.
186. Развозжаева, Е.П. Численное моделирование тектонической и термической истории Кындальского грабена Буреинского бассейна (Дальний Восток России) / Е.П. Развозжаева, П.Н. Прохорова, В.В. Лапковский // Тихоокеанская геология. – 2017. – Т. 36. – № 3. – С. 70-87.
187. Рудой, А.Н. Основы теории диллювиального морфолитогенеза / А.Н. Рудой // Известия Русского географического общества, 1997. - Вып. 1. - С. 12-22.
188. Рудой, А.Н. Новые результаты моделирования гидравлических характеристик диллювиальных потоков из позднечетвертичного Чуйско-Курайского ледниково-подпрудного озера / А.Н. Рудой, В.А. Земцов // Лед и снег, 2010. - № 1 (109). - С. 111-118.
189. Руководство пользователя IRAP RMS Roxar, 2006. Roxar Software solution. [Электронный ресурс]. Режим доступа [http://nashaucheba.ru/docs/21/20245/conv\\_4/file4.pdf](http://nashaucheba.ru/docs/21/20245/conv_4/file4.pdf)., свободный. - 2367 с.
190. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М.: Горячая линия-Телеком, 2-е изд., 2008. — 452 с.
191. Рухин, Л.Б. Основы теории литогенеза: учение об осадочных породах / Л.Б. Рухин. - Л.: Гостоптехиздат, 1961. - 779 с.
192. Салин, Ю.С. Конструктивная стратиграфия / Ю.С. Салин. - М.: Наука, 1979. - 173 с.

193. Самареский, А.А. Теория разностных схем / А.А. Самареский. - М.: Наука, 1989. - 616с.
194. Сейсмическая стратиграфия. Использование при поисках и разведке нефти и газа. Часть 1-2, под редакцией Ч. Пейтона. - М.: Мир, 1982. - 846 с.
195. Скоробогатов, В.А. Гыдан / В.А. Скоробогатов, Л.В. Строганов. - М.: Недра, 2006. - 261 с.
196. Скрипкин, С.Н. Новые сейсмические атрибуты для структурного анализа / С.Н. Скрипкин // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. - 2009, № 4. - С. 132-137.
197. Смоляк, С.А. Сплаины и их применение / С.А. Смоляк // Экономика и математические методы, 1971. - Т.7. - вып.3. - С. 419-431.
198. Соболевский, П.К. Современная горная геометрия / Соболевский П.К. // Социалистическая реконструкция и наука, 1932. - вып. 7. - С. 42-78.
199. Справочник по нефтепромысловой геофизике. / ред. Н.Е. Быков, М.И. Максимова, А.Я. Фунсова - М.: Недра, 1981. - 525 с.
200. Стефанов, Ю.П. Формирование «цветковых» структур разрушения при продольном сдвиге массива горных пород / Ю.П. Стефанов, Р.А. Бакеев // 2-ая Российско-Китайская научная конференция «Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах». Сб. научных трудов. г. Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012. – С. 39-44.
201. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Юрская система. / Ред. А.Э. Конторович, 2000. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО». - 480 с.
202. Стратиграфический кодекс России. Издание третье. СПб: Издательство ВСЕГЕИ. - 2006. - 96 с.



203. Стратиграфия и математика. / ред. Ю.А. Косыгин, Ю.С. Салин, В.А. Соловьев. - Хабаровское книжное изд-во, Хабаровск, 1974. - 208 с.
204. Страхов, Н.М. О периодичности и необратимости эволюции осадкообразования в истории Земли / Н.М. Страхов // Изд. АН СССР. - Сер. геол., 1949. - № 6. - С. 70-112.
205. Страхов, Н.М. Основы теории литогенеза. / Н.М. Страхов // в 3-х томах. - М.: Изд.-во АН СССР. - т. 1, 1960. - 212 с. - т. 2, 1960. - 574 с. - т. 3, 1962. - 550 с.
206. Тер-Саркисов, Р.М. Разработка месторождений природных газов / Р.М. Тер-Саркисов. - М.: ОАО "Издательство "Недра", 1999. - 659 с.
207. Технология автоматизированной корреляции данных ГИС, 2012. - ВСЕГЕИ. [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://gritsenko1.wmsite.ru/ftpgetfile.php?id=108>, свободный.
208. Трофимук, А.А. Принципы районирования нефтегазоносных бассейнов в аспекте цикличности седиментогенеза / А.А. Трофимук, Ю.Н. Карогодин // Геология и геофизика, 1974. - № 3. - С. 12-18.
209. Трофимук, А.А. Теоретические и прикладные вопросы цикличности осадконакопления / А.А. Трофимук, Ю.Н. Карогодин // Основные вопросы цикличности седиментогенеза. - М.: Наука, 1977. - С. 9-33.
210. Фатьянов, А.Г. Математическое моделирование волновых полей в средах с криволинейными границами / А.Г. Фатьянов // ДАН, 2005. - Т. 401. - № 4. - С. 529-532.
211. Филиппов, Ю.Ф. Численное моделирование соляного тектогенеза в кембрийских отложениях Предъенисейского осадочного бассейна (Западная Сибирь) / Ю.Ф. Филиппов, В.В. Лапковский, Б.В. Лунев // Геология и геофизика, 2009. - т.50. - N 2. - с.127-136.
212. Фролов, В.Т. Циклы и циклиты – атрибуты геологических процессов и формаций / В.Т. Фролов // Вестник Московского университета, серия 4 – геология. - №2, 1998. - С. 3-11.

213. Харбух, Дж. Моделирование на ЭВМ в геологии / Дж. Харбух, Г. Бонэм-Картер. - М.: Мир, 1974. - 312 с.
214. Хаттон, Л. Обработка сейсмических данных: теория и практика / Л. Хаттон, М. Уэрдингтон, Дж. Мейкин - М.: Мир, 1989. – 216 с.
215. Хермен, Г. Восстановление изображений по проекциям / Г. Хермен. Основы реконструктивной томографии. - М.: Мир, 1983. - 352 с.
216. Хэллем, Э. Интерпретация фаций и стратиграфическая последовательность / Э. Хэллем. — М.: Мир, 1983.— 328 с.
217. Цветухин, И.В. Анализ и сравнение точности построения глубинно-скоростной модели методами когерентной инверсии и сеточной томографии / И.В. Цветухин, Л.А. Гурвич, С.В. Горбачев, Ю.В. Шулико, В.М. Музыченко // 13-я конференция «Геомодель-2011». Россия. Геленджик. 11-15 сентября 2011 г. – С. 293-296.
218. Центральная Геофизическая Экспедиция. Программа DV-SeisGeo. [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.dvseisgeo.ru/>, свободный.
219. Черемисина, Е.Н. Геоинформационные системы в природопользовании / Е.Н. Черемисина, А.А. Никитин, 2006, [Электронный ресурс]. Режим доступа [http://www.geosys.ru/images/articles/Cheremicina\\_Nikitin\\_3\\_2006.pdf](http://www.geosys.ru/images/articles/Cheremicina_Nikitin_3_2006.pdf) , свободный.
220. Чечулин, В.Л. К обоснованию метода устойчивого оценивания посредством неравенства Чебышева / В.Л. Чечулин // Вестник Пермского ун-та. - сер. Математика. Механика. Информатика, 2010. - вып. 2 (2). - С. 29–32.
221. Чечулин, В.Л. Об оценке масштаба (дисперсии) выборки, не использующей оценку положения (среднего). Пермский государственный университет, ММФ, 2011. 4 с. [Электронный ресурс] / Режим доступа [http://www.uresearch.psu.ru/files/articles/486\\_3449.doc](http://www.uresearch.psu.ru/files/articles/486_3449.doc), свободный.

222. Шайбаков, Р.А. Детальная корреляция пластов группы БС на Правдинском нефтяном месторождении в связи с вопросом применимости методики автокорреляции скважин по данным ГИС / Р.А. Шайбаков // Молодой ученый. — 2012а. — №1. - Т.1. — С. 80-83.
223. Шайбаков, Р.А. Использование нейросетевого аппарата для идентификации границ геологических объектов / Р.А. Шайбаков // Технические науки: традиции и инновации: материалы междунар. заоч. науч. конф. (г. Челябинск, январь 2012b). — Челябинск: Два комсомольца, 2012. — С. 8-11.
224. Шлезингер, А.И. Региональная сейсмостратиграфия / А.И. Шлезингер. - Труды: Российская Академия наук, Геологический ин-т. - М.: Научный мир, 1998. - вып. 512. - 144 с.
225. Aarnes, J.E., S. Krogstad, K.-A. Lie. Multiscale Mixed / Mimetic Methods on Corner-Point Grids / J.E. Aarnes, S. Krogstad, K.-A. Lie // 2006. [Электронный ресурс]. Режим доступа – <http://folk.uio.no/kalie/papers/msmfem-cpg.pdf>, свободный.
226. Anderson, R. Y., and Kirkland, D. W., 1966, Intrabasin varve calibration: Geol. Soc. America Bull., v. 77, no. 3, p. 241–256
227. Berlioux, A., Building models with GOCAD. / A. Berlioux // Stanford Exploration Project, Report 80, May 15, 2001, 20 p. [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://sepwww.stanford.edu/public/docs/sep80/arnaud1.pdf>, свободный.
228. Blessent, D. Integration of 3d geological and numerical models based on tetrahedral meshes for hydrogeological simulations in fractured porous media. / D. Blessent. Departement de geologie et de genie geologique faculté des sciences et de génie université laval Québec, 2009. - 195 p.
229. Bouanga, E. Implications of HorizonCubes in shallow hazard interpretation / E. Bouanga, J. Selvage, F. Qayyaum, Ch. Jones, S. Brazier, J. Edgar // First Break. March 2014, vol. 32. - P. 67-73.

230. Brouwer, F. Maximizing the value of seismic data through increased horizon mapping: applications in the Middle East and Canada / F. Brouwer, P. de Groot, M. Kumpus // *First Break*. March 2011, vol. 29. - P. 87-92.
231. Caers, J. *Petroleum Geostatistics*. / J. Caers // *Society of Petroleum Engineers*, 2005. - 88 p.
232. Caumon, G. 3D Stratigraphic models: representation and stochastic modeling / G. Caumon, J.-L. Mallet // 2006, *Int. Assoc. for Mathematical Geology XIth International Congress*. [Электронный ресурс]. Режим доступа  
[http://www.gocad.org/w4/publications/2006/IAMG06\\_S14\\_08.pdf](http://www.gocad.org/w4/publications/2006/IAMG06_S14_08.pdf),  
свободный
233. Caumon, G. 3D implicit stratigraphic model building from remote sensing data on tetrahedral meshes / G. Caumon, G. Gray, Ch. Antoine, M.-O. Titeux // *Theory and application to a regional model of La Popa Basin. NE Mexico*, 2012. *IEEE TRANS. GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*. [Электронный ресурс]. режим доступа  
<http://www.gocad.org/w4/publications/2012/TGRS-2010-01.pdf>, 12 p.  
свободный.
234. Chiles, J.P. *Geostatistics. Modeling special uncertainty* / J.P. Chiles, P. Delfiner. *Wiley series in probability and statistics*. Wiley & Sons, 1999. - 695 p.
235. Crain, I.K. 1970, Computer interpolation and contouring of two dimensional data review / I.K. Crain // *Geoexploration* № 8. - p. 71-86.
236. De Geer, G. 1912, A geochronology of the last 12000 years / G. De Geer // *Inter. Geol. Congr. Stockholm, 1910*. - p. - 241-253.
237. Dorigo, M. Positive feedback as a search strategy / M. Dorigo, V. Maniezzo, A. Colorni // *Milano: Politecnico di Milano*, 1991. – 22 p.
238. Dorigo, M. *Optimization, Learning and Natural Algorithm* / M. Dorigo. *Milano: Politecnico di Milano*, 1992. – 140 p.
239. Dulac, J.-C. Approach couples fluid flow, geometrical simulations in 3D reservoir modeling / J.-C. Dulac, E. Gringarten // 2011, January, 4 p.

240. Durand-Riard, P. Handling natural complexity in 3D geomechanical restoration, with application to the recent evolution of the outer fold-and-thrust belt, deepwater Niger Delta / P. Durand-Riard, C.A. Guzowski, G., M.-O. Titeux // 2013, AAPG Bulletin. - vol. 97. - № 1. - p. 87-102
241. DV-SeisGeo. [Электронный ресурс]. Режим доступа [www.dvseisgeo.ru/Manual/Seismic\(I\)/Seismic\(I\)-22.htm](http://www.dvseisgeo.ru/Manual/Seismic(I)/Seismic(I)-22.htm), свободный.
242. Emerson. Irap RMS. 2012, [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://support.roxar.com/iraprms/>, свободный.
243. Galton, Fr. Composite portraits / Fr. Galton // Nature. May 1878. - Vol. XVIII. - P. 97–100.
244. Geosoft Inc. 2012, Target Geosoft. [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.geosoft.com/products/target>, свободный.
245. Gibbs, A. J. The diagram, a method for comparing sequences. Its use with amino acid and nucleotide sequences / A. J. Gibbs, G. A. McIntyre // European Journal of Biochemistry, 1970. - vol. 16 - pp. 1–11.
246. Gocad. [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.gocad.org/w4/>, свободный.
247. Grace, Wahba. Spline Models for Observational Data / Wahba Grace // 1990, 59. – SIAM. - 162 p.
248. Griswold, W.T. Geology of oil and gas fields in Steubenville, Burgettstown and Claysville quadrangles / W.T. Griswold, M.J. Munn // 1907, Washington. - Government printing office. - 196 p.
249. Griswold, W.T., Structural work during 1901-02 in the eastern Ohio oil field / W.T. Griswold // In Bulletin № 213. - pp. 336-344.
250. Haites, T.B. Perspective correlation / T.B. Haites // AAPG Bulletin American Association of Petroleum Geology, 1963. - vol. 47, No 4. - pp. 553 – 574.
251. Harder, R.L. Interpolation using surface splines / R.L. Harder, R.N. Desmarais // Journal of Aircraft, 1972. - Vol.9, № 2. - pp. 189-191.
252. Introduction to 3D Geomodelling with gOcad. Lecture materials Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2012. [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://tu->

- freiberg.de/fakult3/gy/mageo/lehre\_3d/vorlesung/script\_uebung.pdf,  
свободный, 54 p.
253. Jayr, S. The need for a correct geological modeling support: the advent of the UVT-transform / S. Jayr, E. Gringarten, A.-L. Terlois, J.-L., J.-C. Mallet Dulac // *First Break*, 2008. - v.26, October, EAGE. - p. 73-79.
254. Jekhowsky B., 1963, La methode des distances minimales, nouveau precede quantitatif de correlation stratigraphique; exemple d'application on palinologie: *Rev. Inst. Franc, du Petrole*, Paris, 18, 5, 629 - 653
255. Krogstad, S. Multiscale mixed/mimetic methods on corner-point grids / S. Krogstad, J.E. Aarnes, K.-A. Lie // *Computational Geosciences*, 2008. - 12(3). – p. 297–315.
256. Kuenen, P.H. Turbidity currents as a case of graded bedding / P.H. Kuenen, C.L. Migliorini // *J. Geol.*, 1950. - v. 58. - p. 91-127.
257. LMKR GeoGraphix. 2013. [Электронный ресурс]. режим доступа <http://www.lmkr.com/geographix/>, свободный.
258. Lee, C. Y. An Algorithm for Path Connections and Its Applications / C. Y. Lee // 1961, *IRE Transactions on Electronic Computers EC-10* (2). – pp. 346–365.
259. Lineman, D.J. Well To Well Log Correlation Using Knowledge-Based Systems and Dynamic Depth Warping / D.J. Lineman, J.D. Mendelson, M.N. Toksos //, *SPWLA 28-th Annual Logging Symposium*, June 29-July 2, 1987. Rull, V. “High-Impact Palynology in Petroleum Geology: Applications from Venezuela (Northern South America)”, *AAPG Bulletin*. - v. 86. - pp. 421-453.
260. Mallet, J-L. 1997. Discrete Modelling for natural objects / J-L. Mallet // *Mathematical Geology*. - vol. 29. - №2 - p. 199-219.
261. Mallet, J-L. 2002. *Geomodeling* / J-L. Mallet // New York, NY: Oxford University Press. - 599pp.
262. Mandelbrot, B. *The fractal geometry of Nature* / B. Mandelbrot // 1982. Freeman & Co. - 480 p.
263. Mirowski, P. New Software for Well-to-Well Correlation of Spectroscopy Logs [Электронный ресурс]. / P. Mirowski, M. Herron, N.

- Seleznev, S. Fluckiger, D. McCormick // Режим доступа [http://cs.nyu.edu/~mirowski/pub/AAPG\\_2005\\_NewSoftwareForWell2WellCorrelation.pdf](http://cs.nyu.edu/~mirowski/pub/AAPG_2005_NewSoftwareForWell2WellCorrelation.pdf), свободный 6 p.
264. Mimetic Finite Difference Method on GPU. Application in Reservoir Simulation and Well Modeling. Supervisor: Kvamsdal Trond, Norwegian University of Science and Technology. Department of Mathematical Sciences. 2010. 97 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://daim.idi.ntnu.no/masteroppgave?id=5668>, свободный.
265. Nadia Rodova, Will Russia replicate US success in tight oil development? / Nadia Rodova // S&P Global Platts, 23 August 2012. Режим доступа <http://www.platts.com/newsfeature/2012/oil/russianoil/index>, свободный.
266. Oxford English Dictionary. [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.oed.com/>, свободный.
267. Pearce, T.J. Chemostratigraphy: a method to improve interwell correlation in barren sequences - a case study using onshore Duckmantian/Stephanian sequences (West Midlands, U.K.). / T.J. Pearce, B.M. Besly, D.S. Wray, D.K. Wright // 1999. Sedimentary Geology: 124, 1-4. - p. 197-220.
268. Perrett, D.I. Facial shape and judgments of female attractiveness. / D.I. Perrett, K.A. May, & Yoshikawa, S. // Nature, 1994. - Vol. 368. - P. 239-242.
269. Schoenberg, A. Contributions to the problem of approximation of equidistant data by analytic functions. Part A: On the problem of smoothing or graduation, a first class of analytic approximation formulas. / A. Schoenberg // Quart. Appl. Math. - vol. 4, 1946. - pp. 45-99.
270. Schoenberg, A. Contributions to the problem of approximation of equidistant data by analytic functions, Part B: On the problem of osculatory interpolation, a second class of analytic approximation formulae. / A. Schoenberg // Quart. Appl. Math. 4, 1946. - pp. 112-141.

271. Schlumberger. 2012a., Petrel 2012. [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.slb.com/services/software/geo/petrel/.aspx>, свободный.
272. Schlumberger. 2012b, Корреляция скважин в Petrel. [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://sis.slb.ru/sis/item94>, свободный.
- 273.** Siberia's Lena Delta. [Электронный ресурс]. [https://www.nasa.gov/topics/earth/earthday/lena\\_delta.html](https://www.nasa.gov/topics/earth/earthday/lena_delta.html). Режим доступа, свободный.
274. Skaflestad, B. The MATLAB reservoir simulation toolbox / B. Skaflestad // SIAM Geosciences 2011, Long Beach, CA, USA, 21-24 March. [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.sintef.no/project/GeoScale/slides/2011/siam-gs11-mrst.pdf>, свободный.
275. Smith, W. H. F. Gridding with continuous curvature splines in tension / W. H. F. Smith, P. Wessel // Geophysics, 1990. — Vol. 55, no. 3. — pp. 293-305.
276. Tearpock, D.J. Applied Subsurface Geological Mapping with Structural Methods / D.J. Tearpock, R.E. Bischke. - 2nd Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2002. - 864 p.
- 277.** Technically Recoverable Shale Oil and Shale Gas Resources: An Assessment of 137 Shale Formations in 41 Countries Outside the United States (PDF). [Электронный ресурс]. U.S. Energy Information Administration (EIA) (June 2013). Режим доступа <http://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/pdf/fullreport.pdf>, свободный.
278. Tom, J. Höcker 3-D Grid Types in Geomodeling and Simulation – How the Choice of the Model Container Determines Modeling Results. / J. Tom, Höcker // AAPG Search and Discovery Article #90090©2009 AAPG Annual Convention and Exhibition, Denver, Colorado, June 7-10, 2009.
279. Wackernagel, H. Multivariate Geostatistics / H. Wackernagel // Springer, 2003. - 403 p.



280. Weller, J.M. Cyclical sedimentation in the Pennsylvanian period and its significance / J.M. Weller // J. Geol. 1930. - v. 38, N 2. - p. 97-135.
281. Weller, J.M. Cyclic sedimentation / J.M. Weller // Geol. Mag. 1960. - v. 97, N 5. - 389-403.
282. Wheeler, H. E. 1958, Time Stratigraphy. / H.E. Wheeler // Bulletin of the American Association of Petroleum Geology. 42(5), p. 1047, 1063.
283. Wikipedia, the free encyclopedia. [Электронный ресурс]. Режим доступа [http://en.wikipedia.org/wiki/Main\\_Page](http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page), свободный.