

*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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора геолого-минералогических наук

Новосибирск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук.

**Официальные оппоненты:**

**Гвишиани Алексей Джерменович,**

доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН, ФГБУН Геофизический центр РАН (г. Москва), директор;

**Скляр Евгений Викторович,**

доктор геолого-минералогических наук, профессор, член-корреспондент РАН, ФГБУН Институт земной коры СО РАН (г. Иркутск), главный научный сотрудник;

**Лебедев Михаил Валентинович**

доктор геолого-минералогических наук, ООО «Тюменский нефтяной научный центр» (г. Тюмень), эксперт.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт» (г. Москва)

Защита состоится 25 декабря 2018 г. в 10 час. на заседании диссертационного совета Д 003.068.02 на базе ФГБУН Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, в конференц-зале.

Отзыв в двух экземплярах, оформленный в соответствии с действующими требованиями (см. вклейку), просим направлять по адресу:

630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3

факс (8-383) 330-28-07,

e-mail: KostyrevaEA@ipgg.sbras.ru.

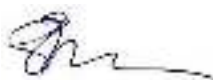
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИНГГ СО РАН

<http://www.ipgg.sbras.ru/ru/education/committee/Lapkovskiy2018>

Автореферат разослан 22 октября 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
К.Г.-М.Н.

8(383)3309517



Е.А. Костырева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 большинство 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». 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 изобретением «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, *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*), 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 трудность 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 тему 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 поплавовой, 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 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 связанному 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. 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, 2014);

6. библиотека программных модулей GeoLib (Бердов, Власов, Лапковский, 2012);

7. совместно со специалистами ЗАО «Пангея», создана многоплатформенная 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).

Все перечисленные программные продукты широко используются в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, а также в других академических, отраслевых, учебных организациях 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 формализации, совершенствованию математического аппарата и алгоритмов компьютерных технологий 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 свидетельств о государственной регистрации. Способ построения непрерывных сейсмостратиграфических моделей разрезывающих 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 и Восточной Сибири.

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

**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: (СНИИГиМС, 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. Кропчеву, А.И. Ларичеву, М.Б. Лурье, П.Н. Мельникову, А.В. Новокрещину, А.Г. Плавнику, В.Ф. Свиныну, 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.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **Главе 1** анализируется состояние проблемы, рассматривается история проникновения математических методов в геологию. Даются формулировки понятий, используемых в работе: **оптимизация, геологическая граница, непрерывная сейсмостратиграфическая модель**. Через призму собственного опыта формулируются требования к функциональному наполнению технологий геологического и сейсмогеологического моделирования. **Глава 2** рассматривает вопросы, связанные с оптимизационной постановкой и решением задачи литостратиграфической корреляции разрезов скважин по данным ГИС. Исследуется влияние на результаты корреляции использования различных мер различия, минимизируемых функционалов и их параметров. Предлагаются многомерные меры различия, позволяющие получать оптимальные корреляционные решения для групп скважин, а не для парных сопоставлений, что позволяет избежать возникновение проблемы невязок корреляции. **Глава 3** посвящена предложенному автором методу создания обобщенного образа скважин по данным ГИС, который основан на совмещении группы скважин по набору стратиграфически эквивалентных точек. Исследованы возможности использования данного метода в решении ряда задач: выявление общих свойств и индивидуальных особенностей поведения каротажных кривых для группы скважин, прогноз значений каротажных диаграмм и физических свойств проектируемой скважины, построение трехмерных моделей распределения литологических и петрофизических свойств, вычисление аномальных (локальных) характеристик разрезов скважин по отношению к фоновым и создание соответствующих трехмерных моделей. В **Главе 4** рассмотрен способ построения непрерывных сейсмостратиграфических моделей для сейсмических разрезов МОГТ и получения двумерных и трехмерных результирующих пространственных распределений сейсмостратиграфического параметра. Показана возможность использования данного вида преобразований для структурной интерпретации разрезов и качественного прогноза пространственного распределения физических и литологических свойств разреза. На основе интерпретации сейсмических данных связанной группы разрезов возможно построение кубов распределения данного параметра. В **Главе 5** описываются методика и технология, разрабатываемые для построения двумерных сеточных моделей. Методика основана на двухкомпонентной аппроксимации имеющихся данных с использованием, в качестве базовых, методов кригинга и аппроксимации двумерными аналитическими сплайнами, выраженными через функции

Грина. Рассмотрены вопросы подготовки и коррекции исходных данных, учета разрывных нарушений. Обсуждены возможности данного подхода при построении трехмерных моделей, а также при создании и использовании нерегулярных сеточных каркасов для представления тел сложной геометрии и при получении непрерывных сейсмостратиграфических моделей, учитывающих заданные разрывные нарушения и геометрию отражающих горизонтов. Представлен опыт построения квази-трехмерного сейсмического куба по набору пересекающихся 2D разрезов. В **Главе 6** рассматриваются вопросы, преобразований и анализа моделей геологических границ на основе дифференциальных преобразований и вычисления коэффициентов сходства с вращающимися анизотропными палетками. Показана возможность выделения типовых геоморфологических и тектонических форм на ряде реальных объектов. В заключительной **Главе 7** работы приведены результаты выполненных построений для мезо-кайнозойских осадков одного из нефтегазовых месторождений севера Западной Сибири. Представлены результаты структурной интерпретации сейсмических и скважинных данных, диагностики областей разрывных нарушений. Детально представлена технология автоматических корреляции скважин по данным ГИС с построением сводного разреза с послойным сопоставлением всех скважин объекта исследования.

## **ЗАЩИЩАЕМЫЕ НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ**

**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.**

Попытки создания автоматизированных систем корреляции слоев в разрезах скважин с разной степенью успешности предпринимались с 60-х годов прошлого века. В работе Б. Жековского (1963) эта задача для двух скважин впервые поставлена как оптимизационная – нахождения лучшей линии на двумерном планшете, осью абсцисс которого являются глубины одной скважины, а осью ординат – другой. Двумерное поле планшета заполнено значениями некоторой функции различия между соответствующими точками первой и второй скважин. Если корреляция проводится по данным ГИС, такой мерой различия или сходства может являться одна из следующих:

$$\Delta_1 = \frac{1}{b-a} \int_a^b |f_1(x) - f_2(x)| dx, \quad (1)$$

$$\Delta_2 = \frac{1}{b-a} \int_a^b (f_1(x) - f_2(x))^2 dx, \quad (2)$$

$$K = \frac{\int_a^b (f_1(x))(f_2(x)) dx}{\|f_1(x)\| \|f_2(x)\|}, \quad (3)$$

$$R = \frac{\int_a^b (f_1(x) - \bar{f}_1)(f_2(x) - \bar{f}_2) dx}{\|f_1(x) - \bar{f}_1\| \|f_2(x) - \bar{f}_2\|}. \quad (4)$$

Здесь  $\bar{f}_1$  и  $\bar{f}_2$  – средние значения  $f_1(x)$  и  $f_2(x)$  на интервале  $[a, b]$ ,  $\|\varphi(x)\|$  – норма функции, в данном случае также, вычисленная для интервала  $[a, b]$ .

$$\|\varphi(x)\|^2 = \int_a^b \varphi^2(x) dx.$$

А  $f_1(x)$  – значения некоторого вида каротажа в первой скважине, а  $f_2(x)$  – во второй. Две первые меры – меры расстояния между кривыми, они не могут быть отрицательными, третья мера – нормированное скалярное произведение, четвертая – коэффициент корреляции меняется в интервале  $[-1, 1]$ . В такой постановке, задача корреляции для двух скважин решалась Ш.А. Губерманом и М.И. Овчинниковой (1972), В.Ф. Гришкевичем (1974, 1977, 1982, 1984, 1999). А в более позднее время и в настоящие дни схожие постановки используются в работах И.С. Гутмана с соавторами (2000, 2005, 2006, 2010, 2013), Е.В. Ковалевского и др. (2007, 2010, 2018). Имеется опыт решения задач корреляции в данной постановке и зарубежными исследователями: Lineman D.J. (1987), Mirowski P. t (2005).

В настоящей работе используются два вида функции различия между каротажными кривыми:

$$\sqrt{\Delta_2}, \quad (5)$$

и

$$\frac{1-R}{2}. \quad (6)$$

Если каротажные кривые предварительно нормированы от 0 до 1, то (5) будет иметь диапазон от 0 до 1, а (6) всегда находится в данном диапазоне.

При построении планшета Жековского различия одновременно по нескольким каротажным графикам двумерные планшеты, построенные по каждому из графиков, суммируются с заданными весами.

В случае попарной корреляции скважин на планшете меры различия строится «корреляционная линия», которая проходит по области минимальных значений функции различия. В этом и заключается оптимизационность задачи. Эта линия должна минимизировать

некоторый функционал, по которому происходит сравнение и оценка вариантов корреляции. В качестве такого функционала мы используем

$$\sum_{i=1}^k f(x_i, y_i) + \beta \sum_{j=1}^n f(x_j, y_j) \rightarrow \min \quad (7)$$

Формула (7) имеет следующий смысл - линия  $L$  строится в двумерном поле меры различия, которое вычислено на регулярной прямоугольной сети, и она выходит из левого нижнего угла, двигаясь в правый верхний угол 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  $L$ ,  $\beta$  – число в диапазоне от 0 до 2.

Если  $\beta = 0$ , то функционал (7) приобретает вид

$$\sum_{i=1}^m f(x_i, y_i) \rightarrow \min \quad (8)$$

Он минимизируется при минимальном числе вертикальных и горизонтальных перемещений, если число строк и столбцов регулярной сети, на которой задана функция различия одинаков, то функционал минимизируется на диагонали, соединяющей противоположные углы планшета.

Если  $\beta = 1$ , то функционал (7) приобретает вид

$$\sum_L f(x, y) \rightarrow \min \quad (9)$$

Здесь  $L$  – линия подлежащая оптимизации, а  $f(x, y)$  – функция различия в точках на этой линии. Если  $\beta = \sqrt{2}$ , то функционал (7) приобретает вид

$$\int_L f(x, y) dL \rightarrow \min \quad (10)$$

то есть, находится линия, которая минимизирует интеграл поля различия.

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

$$\frac{1}{P(L)} \int f(x, y) dL \rightarrow \min \quad (11)$$

где  $P(L)$  – длина линии  $L$ .

Выражение (10) и (11) можно свести к одному уравнению с параметром  $\alpha$  от 0 до 1.

$$\left( \frac{\alpha}{P(L)} + 1 - \alpha \right) \int f(x, y) dL \rightarrow \min \quad (12)$$

При  $\alpha=0$  минимизируется интеграл функции  $f(x, y)$  по линии  $L$ , а при  $\alpha=1$  минимизируется среднее значений этой функции по  $L$ . При



промежуточных значений  $\alpha$  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 1991, 1992). Также применялся волновой алгоритм Ли (1961). Все эти решения давали близкие результаты, но скорость вычисления, простота оказалась лучшей у волнового алгоритма, который закрепился в современной реализации программных продуктов.

Найденная оптимальная линия, задает соответствие между точками глубин двух сопоставляемых скважин, то есть эта линия является корреляционной моделью и ее можно представить как набор стратиграфических границ в пространстве между двумя скважинами. Рисунок 1 иллюстрирует то, как по-разному выглядит поле различия, полученное для одних данных, но с использованием различных мер. Следующий рисунок (Рисунок 2) показывает зависимость получаемого корреляционного решения от выбора минимизируемого функционала. Как видно из него, выбор того или иного функционала (формулы (7) - (12)), самым существенным образом влияют на результат корреляции.

Серьезный вопрос – корреляция множества скважин, расположенных на плоскости и связанных сложными отношениями, когда каждая скважина имеет более двух соседей в графе парных корреляционных отношений. Здесь существует серьезная трудность, на которую указывали И.С. Гутман с соавторами (2005), а также А.С. Кашик и др. (2010) – невязки, которые возникают при движении по замкнутым контурам. Она может проявиться даже при корреляции трех скважин, когда - мы уходим из одной точки, парными корреляциями движемся по замкнутому контуру и приходим на эту же скважину, но уже в другую точку. Вертикальное расстояние между точкой, из которой мы начали построение корреляционной модели для некоторой границы, и точкой, в которую мы вернулись на данной скважине, и есть невязка (или ошибка корреляции). Избавится от этих невязок довольно сложная задача, которая решена автором за счет использования многомерной меры различия. Сами многомерные меры различия вычисляются из парных

мер различия. Парные меры используются как базис на основании которого вычисляются функции многомерного различия. В частности, автором использовались следующие формулы для вычислений:

$$F_x(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum f(x_i, x_j) w_{ij}, \quad (13)$$

$$F_x(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sqrt{\sum [f(x_i, x_j) w_{ij}]^2}, \quad (14)$$

$$F_x(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum^{w_{ij}} \sqrt{\prod w_{ij} \cdot f(x_i, x_j)}. \quad (15)$$

Здесь  $f(x_i, x_j)$  – все вычисленные функции парных мер различия, а  $w_{ij}$  – индивидуальные веса этих функций. Суммирование происходит по ребрам, связывающим соседние скважины в корреляционном графе. По существу, одним из видов многомерной функции различия является значение дисперсии некоторой случайной величины. В.Л. Чечулиным доказано (в его статье, это теорема 1), что дисперсию можно вычислить через парные разности, а именно:

$$D_2(X) = \frac{1}{2 \cdot n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (x_i - x_j)^2. \quad (16)$$

Подобные конструкции используются и в формулах (13-15), в которых также многомерное различие вычисляется через известные парные различия.

На практике весь процесс управляется весами  $w_{ij}$ .

С помощью весов можно вычислять такие оценки, которые характеризуют ситуацию для конкретной скважины и всех ее соседей, которые на данный момент включены в корреляционное решение. То есть, некотором шаге задачи присоединяем к общему решению скважину с номером  $k$ . Для парных функций различия  $k$ -той скважины со всеми её соседями, которые уже включены в корреляционную модель, устанавливаем вес 1, а для всех остальных вес будет равен 0.

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, например, по формуле (14). 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. Данный способ проиллюстрирован рисунком 3. Здесь на основе двух каротажных методов (ПС и ИК) к существующему решению из двух скважин присоединяется третья скважина (правая в

верхней части рисунка). На планшете (Рисунок 3а) показана многомерная мера различия, вычисленная по трем скважинам. По оси  $x$  – номера согласованных корреляционной моделью пар глубин первой и второй скважин, а по  $y$  – глубины присоединяемой третьей скважины. Черная линия – вариант оптимальной корреляции. На рисунке 3б в привычном виде показан результат присоединения третьей скважины к существующему решению на основе вычисления многомерной меры различия. Подобный процесс проводится последовательно для любого числа скважин и формально он описан ниже.

Оптимизационную задачу для всего множества скважин можно представить в следующем виде. Пусть  $X$  - область евклидова пространства  $E_n$  глубин всех скважин, интервала корреляции. 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 задачу можем поставить следующим образом:

$$\int_L f(x_1, x_2, \dots, x_n) dL \rightarrow \min. \quad (17)$$

Однако, поскольку её решение является в вычислительном плане, крайне ресурсоемким, 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

$$\int_{L^{k+1}} F^{k+1} X(\bar{x}^k, x_k) dL^{k+1} \rightarrow \min \quad (18)$$

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. Здесь для описания выбран один минимизируемый функционал, хотя задача аналогично решается для любого функционала из (7-12). На практике, благодаря использованию весов  $w_{ij}$ , реализуется следующий процесс присоединения к решению  $k$ -той скважины. Находятся все ребра графа отношений между скважинами (в частном случае это может быть триангуляционная сеть, соединяющая скважины), которые связывают  $k$ -тую скважину со всеми скважинами из вектора  $\bar{x}^k$ , этим ребрам приписываются значения весов равные 1, всем другим ребрам графа отношений скважин, приписываются веса 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 значений 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 с учетом всех своих соседей, для которых уже решена задача корреляции.** При этом невязки корреляции на треугольниках, которые практически всегда присутствуют при использовании только парных сопоставлений скважин, не возникают.

**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.**

У метода, защищаемого в качестве второго положения, есть прототип – способ создания обобщенного портрета Фрэнсиса Гальтона, который широко используется в антропологии. Фрэнсис Гальтон оставил заметный след в мировой науке, и одно из его достижений, описанное в работе, «Composite portraits» (Galton, 1878) - метод составления обобщенного изображения человеческого лица по многочисленным фотографиям разных людей. В его основе лежит совмещение отдельных изображений по характерным точкам. Ф. Гальтон использовал совмещение лиц по двум осям: одна из которых проходит через зрачки, а вторая ортогональна к первой оси и делит лицо пополам. Сейчас предложенный Гальтоном подход реализован в программах обработки изображений и широко используется антропологами для выявления и визуализации групповых особенностей, а также морфологической изменчивости в группах людей (Перевозчиков, Маурер, 2009; Локк, 2011). При этом для совмещения лиц используются сотни пар характерных точек (Perrett et al., 1994). Когда выявляются различия обобщенных изображений людей, мы признаем, что эти различия реально существуют для данных групп. При сравнении портретов

реальных людей, пусть даже вполне типичных представителей своих групп, их различие можно толковать как несовпадение индивидуальных особенностей. В геологии развита практика сравнения отдельных объектов, соответственно, выводы, полученные при таком сравнении можно обобщить на группы, к которым принадлежат данные объекты, с определенными сомнениями. Предлагаемый автором подход, позволяет конструировать для геологических тел и осадочных комплексов их обобщенные модели по данным ГИС.

Важнейшим шагом при конструировании таких моделей является совмещение отдельных объектов по их характерным точкам. Различные скважины, из которых создается обобщенный образ, совмещаются по результатам автоматической корреляции данных каротажа, после чего их каротажные кривые, а также некоторые другие параметры (альтитуда ротора, стратиграфические разбивки), суммируются с заданными весами.

Объектом, на котором отрабатывался метод, является разрез верхнеюрских отложения юго-западной части Нюрольской впадины в Западной Сибири. Автором использованы материалы из базы данных ИНГГ СО РАН по 68 глубоким скважинам района, а также учитывались карты отражающих горизонтов этого района. Для корреляции разрезов всех 68 скважин привлекались данные следующих видов каротажа: ГК (гамма-каротаж), КС (кажущееся сопротивление),  $\alpha$ ПС (альфа-функция от каротажа самопроизвольной поляризации), ИК (индукционный каротаж). После получения корреляционной модели, обобщаемые скважины совмещаются даже не по отдельным отождествленным горизонтам, а непрерывно по всему диапазону глубин интервала корреляции. Это позволяет сделать то, что корреляционная модель задается непрерывной линией на планшете меры различия и каждой точке одной скважины в интервале корреляции может быть поставлена в соответствие точка или диапазон глубин любой другой скважины. На основании метода построения обобщенных образов скважин могут решаться следующие задачи:

***Выявление общих свойств и индивидуальных особенностей поведения каротажных кривых для группы скважин.*** Построение обобщенных скважин для отдельных площадей, групп площадей или месторождений. Работы, выполненные на скважинах юго-западной части Нюрольской впадины, показали (Рисунок 4), что для обобщенных скважин верхнеюрских отложений всей этой части Нюрольской впадины, а также для отдельных площадей: Игольско-Таловой, Карайской, Тагайской, Глуховской, Федюшкинской, характерны некоторые общие черты. А именно – смещение аномалии КС вниз по

разрезу относительно аномалии ГК. Это смещение, по-видимому, характерно для центральных районов Западной Сибири.

Также для площадей, кроме Игольско-Таловой, юго-западной части Нюрольской впадины кривая индукционного каротажа в интервале георгиевской свиты имеет резкое увеличение значений, которое связано с присутствием глауконита и пирита в породах. Отсутствие положительной аномалии в районе Игольско-Талового месторождения связано уменьшением мощности, вплоть до полного выклинивания георгиевской свиты здесь. На обобщенной скважине Игольско-Талового месторождения значения индукционного каротажа в этой части разреза не превышают его уровня непосредственно над баженовской свитой и плавно снижаются вверх по разрезу васюганской свиты (см. Рисунок 4).

**Прогноз значений каротажных диаграмм и физических свойств проектируемой скважины.** При проектировании и подготовке бурения необходимо спрогнозировать разрез, который будет пройден будущей глубокой скважиной. Разумным решением представляется вычисление для точки заложения скважины её обобщенного образа на основании имеющихся поблизости скважин. Если в предыдущей задаче при построении обобщенного образа скважины в Нюрольской впадине, реальный каротаж индивидуальных скважин учитывался с равными весами, то при моделировании образа разреза в конкретной точке следует с разными весами учитывать скважины, находящиеся на разном расстоянии от этой точки. В текущей реализации метода функция веса  $i$ -той скважины определяется как  $1/R_i^2$ , где  $R_i$  – расстояние от точки прогноза до  $i$ -той скважины. Положение стратиграфических границ, положение экстремумов и характерных точек каротажных кривых прогнозной скважины может корректироваться с учетом имеющихся сейсмических моделей отражающих горизонтов для положения проектируемой скважины.

**Построение трехмерных моделей распределения литологических и физических 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, то каждая, полученная таким образом обобщенная скважина, охарактеризует вертикальный разрез в конкретной точке с учетом стратиграфических отношений. Соответственно, мы можем на одинаковых глубинах по 3D сетке заполнить все пространство спрогнозированными значениями каротажа. Этот куб может создаваться с корректировкой геометрии по надежным сейсмическим моделям. Далее можем вычислить производные свойства. Например, если мы знаем регрессионное уравнение для коэффициента

пористости от некоторых видов каротажа, то можем построить куб пористости интересуемой области пространства.

Нами был выполнен расчет кубов основных видов каротажа и пористости для верхнеюрских отложений юга-запада Нюрольской впадины с учетом сейсмических данных, а также для центральной части этой территории. На рисунке 5 показаны несколько сечений этого куба. Визуализированы могут быть любые вертикальные, горизонтальные или наклонные сечения моделируемой области.

***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. Локальные аномалии позволяют сформулировать критерии прогноза нефтеносности по данным каротажа. 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 фоновый 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, которые характеризуют обобщенную скважину. Таким образом не только по разрезу, но и по площади вычисляются аномальные (локальные) по отношению к фоновым значения каротажных измерений. Для каждого стратиграфического уровня – набора стратиграфически эквивалентных точек вычисляются собственные значения фоновый компоненты каротажа.

**3. Способ 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.**

Предлагается новый способ получения структурной и параметрической информации о геологической среде на основе вычисления сейсмостратиграфического параметра как непрерывной вещественной функции, заданной на всем разрезе (кубе) МОГТ или на

его фрагменте. Для данной функции отдельные изоуровневые линии (в 2D) или поверхности (в 3D) интерпретируются как горизонты.

Под **непрерывной сеймостратиграфической моделью** понимаем вещественную функцию -  $S(\Omega)$ , значения которой зависят от стратиграфического положения точек разреза или куба (термин стратиграфическое положение, здесь и далее в этом разделе, употребляется в смысле оценки стратиграфической позиции объектов на основании анализа сейсмических данных, но не в смысле использования палеонтологического или литолого-стратиграфического анализа). Здесь,  $\Omega$  - пространственная или пространственно-временная область (временной или глубинный разрез), на которой зарегистрировано волновое поле и вычисляется функция  $S$ . Поясним принцип создания такой модели на теоретическом примере разреза, состоящего из двух сейсмических трасс. Поступим с этими трассами также, как мы обращались со скважинами при построении корреляционной модели. Замеренные амплитуды волнового поля (возможно, также и некоторые трансформации амплитуд, выполненные, например, с использованием преобразования Фурье) будем воспринимать как каротажные данные, и найдем оптимальное (с точки зрения лучшего пути на планшете Жековского) отображение этих двух трасс друг на друга:

$$t_2 = \varphi_+(t_1), \quad (19)$$

$$t_1 = \varphi_-(t_2), \quad (20)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – времена (или глубины) первой и второй трассы в заданном интервале, а  $\varphi_+$  и  $\varphi_-$  - их взаимное оптимальное сопоставление.

Теперь, для всего анализируемого интервала времен первой трассы зададим непрерывную монотонную функцию (стратиграфический параметр), меняющуюся сверху-вниз в диапазоне, например, от 0 до 1. Далее, через зависимость (20) можем передать значения этой функции на вторую трассу:

$$s_2(t_2) = s_1(\varphi_-(t_2)). \quad (21)$$

Здесь  $s_1$  и  $s_2$ - значения стратиграфического параметра на первой и второй трассе. Теперь для произвольных точек  $p_1$  и  $p_2$  находящихся на любой из двух трасс считаем справедливым:

$p_1$  стратиграфически ниже чем  $p_2$ , если  $s(p_1) > s(p_2)$ ,

$p_1$  стратиграфически выше чем  $p_2$ , если  $s(p_1) < s(p_2)$ ,

$p_1$  и  $p_2$  стратиграфически эквивалентны, если  $s(p_1) = s(p_2)$ .

Таким образом, проводится непрерывная параметризация сейсмического разреза (в данном случае, состоящего из двух трасс). Ключевое значение здесь имеет слово «непрерывная», поскольку



традиционная структурная интерпретация суммированных и предварительно обработанных разрезов и кубов МОГТ – дискретна. Она основывается на выделении некоторого конечного числа узнаваемых горизонтов, которые можно проследить на значительное расстояние. Детальность традиционной интерпретации обуславливается числом выделенных горизонтов. Но между парой произвольных точек разреза нет прямого способа установить сеймостратиграфические отношения, если они находятся между одними горизонтами. Предлагаемый подход позволяет оценивать стратиграфические позиции точек разреза на непрерывной вещественной шкале, в этом заключается его главное преимущество. В рамках данного подхода возможно автоматически создавать любое количество горизонтов, проходящих через любые заданные точки.

Теперь подробно рассмотрим способ создания непрерывных сеймостратиграфических моделей для реальных разрезов, состоящих из большого числа сейсмических трасс. Как уже отмечено, автором были использованы решения, полученные в рамках разработки методов автоматической корреляции скважин по данным ГИС. Каждая пара сравниваемых сейсмических трасс рассматривается как пара скважин, между которыми проводится сопоставление (аналогичное корреляции) на основе сходства графиков амплитуды записанного сигнала. Для построения модели взаимного отображение трасс использовался планшет Жековского и методы определения оптимальной траектории. Решение задачи оптимизации было реализовано с помощью волнового алгоритм Ли (Lee, 1961). Уже на этом этапе взаимное отображение трасс оказывается непрерывным и является корреляционной линией. Результат, получаемый путем объединения отдельных сопоставлений на весь разрез, также получается непрерывным. В качестве мер сходства фрагментов трасс используются меры сходства, основанные на вычислении квадрата расстояния между двумя функциями (значения амплитуды сейсмической записи) в оцениваемом интервале времени или глубины.

Алгоритм построения сеймостратиграфической модели состоит в следующем. 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  $(t_i^{\min}, t_{i+k}^{\min})$  и  $(t_i^{\max}, t_{i+k}^{\max})$ , оптимизирующую сопоставление сейсмических трасс по критерию их минимального интегрального различия.

$$\int_{L_i^k} f(t_i, t_{i+k}) dL_i^k \rightarrow \min \quad (22)$$

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

$$t_{i+k} = \varphi_+^k(t_i) \quad (23)$$

$$t_i = \varphi_-^k(t_{i+k}) \quad (24)$$

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

$$t_{i+1} = \varphi_+(t_i) = t_i + \Delta(t_i) \quad (25)$$

и

$$t_i = \varphi_-(t_{i+1}) = t_{i+1} - \Delta(t_i). \quad (26)$$

Для вычисления  $\Delta(t_i)$  могут использоваться формулы

$$\Delta(t_i) = \frac{\sum_{k=1}^n w[k] \cdot [(\varphi_+^k(t_i) - t_i) - (\varphi_+^{k-1}(t_{i+1}) - t_{i+1})]}{\sum_{k=1}^n w[k]} \quad (27)$$

и

$$\Delta(t_i) = \frac{\sum_{k=1}^n w[k] \cdot [(\varphi_+^k(t_i) - t_i)]/k}{\sum_{k=1}^n w[k]}. \quad (28)$$

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.

$$q(t_{i+1}) = q[\varphi_+(t_i)] \quad (29)$$

и

$$q(t_{i-1}) = q[\varphi_-(t_{i-1})] \quad (30)$$

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 трассе значения с помощью отображений (29) и (30) переносятся на все трассы разреза. Таким образом, получаем  $j$ -тую реализацию распределения сейсмостратиграфического параметра.

4. Результирующее пространственное распределение сейсмостратиграфического параметра вычисляем как

$$S(\Omega) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M S_j(\Omega). \quad (31)$$

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.

На рисунке 6 приведен фрагмент сейсмического разреза с наложенными изолиниями сейсмостратиграфического параметра. Волновое поле этого разреза ведет себя достаточно согласованно, в верхней части разреза можно выделить порядка десяти узнаваемых отражающих горизонтов. Такие модели строятся полностью в автоматическом режиме. Это позволяет существенно ускорить и облегчить процесс структурной интерпретации сейсмических материалов. Кроме того, детальность структурной интерпретации разреза для такой модели выше, чем при обычном использовании нескольких отражающих горизонтов.

Рисунок 7 показывает, что подобные модели удается строить для достаточно сложных ситуаций. Здесь в разрезе присутствуют клиноформные комплексы неокома 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 сеймостратиграфического параметра ведут себя весьма согласованно с окружающей их волновой картиной. На рисунке также видно, что сеймостратиграфические комплексы, со значениями соответствующего параметра от 0.55 до 0.75, заметно изменяются по своей мощности. Эти изменения соответствует изменению начальной мощности осадков более чем в 100 раз. Ситуация для коррелирования также осложнена еще и тем, что разрез пересекает антиклинальное поднятие.

Автором было проведено тестирование эффективности использования непрерывной сеймостратиграфической модели для улучшения прогноза распределения физических свойств по данным скважинных измерений. Этот тест проводился на сгенерированном синтетическом объекте, который был создан для решения задачи построения физической модели образования клиноформных комплексов Западной Сибири. Причина выбора синтетического объекта состоит в том, что для него известны все пространственные свойства. Соответственно, возможна количественная оценка погрешности стратиграфических, структурных или параметрических построений.

Пропуская расчеты эволюции заполнения бассейна, остановимся на его конечном состоянии. Оно характеризуется пространственным распределением терригенных фракций, одна из которых – объемная доля алевритовой фракции, показана на рисунке 8. Выраженная слоистая структура накапливаемых толщ обуславливается вариациями условий осадконакопления (объем сноса, уровень моря, положением береговой линии и т.п.). Фациальная структура осадочной толщи имеет сигмоидный облик, характерный для клиноформного комплекса Западной Сибири. 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. Данные по распределению фракций, плотности осадков и скорости прохождения продольных волн позволили сгенерировать синтетический сейсмический

разрез и вычислить по его волновому полю непрерывную сейсмостратиграфическую модель.

Распределение плотности уплотненных осадков для конечного состояния задачи моделирования накопления клиноформ показано на рисунке 9а. Осадочная толща сгенерированного синтетического разреза была вскрыта пятью «скважинами». То есть, на разрезе были заданы субвертикальные линии (их положение на разрезе показано тонкими черными линиями), по которым с шагом в один метр сформирован массив данных – координаты точек и значения плотности пород в них. Точное распределение плотности осадочных пород тестового разреза приведено на рисунке 9а. Два других фрагмента рисунка - 9б и 9с построены по результатам восстановления распределения плотности, основанных на одних и тех же данных малого числа скважин. Разрез 9б 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 9с 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 кг/м<sup>3</sup> против 169 кг/м<sup>3</sup>.

Построение непрерывных сейсмостратиграфических моделей полезно при интерпретации данных для групп связанных сейсмических профилей (имеющих общие точки пересечения). В общем случае сейсмостратиграфические модели, построенные для каждого из разрезов, будет иметь несогласованные значения по линиям их пересечения (Рисунок 10а). И в таком случае можно ставить задачу построения или калибровки этих моделей таким образом, чтобы данного несоответствия не возникало или оно было минимизировано (Рисунок 10б). Аналогичная постановка возникает в задаче увязки времен отражающих горизонтов по точкам пересечения сейсмических профилей (Муклыгин, Лапковский, 1985). В основе построения взаимно согласованных моделей пересекающихся разрезов лежит процедура взаимного отображения значения сейсмостратиграфического параметра пересекающихся профилей. В 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 сейсмостратиграфической 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 сейсмостратиграфическая 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 для 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

$$d(p; \varphi(t_j)) = S(t_i) - S(\varphi(t_j)), \quad (32)$$

Поскольку стратиграфический параметр на  $j$ -том разрезе является однозначной и неубывающей функцией от времени уравнение (32) можно записать как функцию поправки от стратиграфического параметра для  $j$ -того профиля.

$$d(p; \varphi(t_j)) = f(S_j).$$

Соответственно, можно пересчитать сейсмостратиграфическую 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 строгое совпадения значений

сейсмостратиграфических 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 сейсмостратиграфического параметра на разных разрезах соответствуют близкие по стратиграфическому положению горизонты.

Помимо тех задач, которые были затронуты в настоящей работе – автоматическое разбиение разрезов сейсмостратиграфическими горизонтами и качественное восстановление пространственного распределения свойств по малому числу данных, предлагаемый подход может быть полезен в следующих приложениях:

1. Непрерывная модель позволяет выполнить палеоструктурные реконструкции для любого стратиграфического уровня; соответственно, можно создавать непрерывные кинематические модели формирования бассейна или его части.

2. Подобные построения могут найти применение при стратиграфической корреляции разрезов скважин. Все автоматизированные методы корреляции, имеют некоторый уровень неоднозначности. Получаемые без учета скважинных данных сейсмостратиграфические модели могут служить хорошим регуляризатором и ограничителем неопределенности при корреляции слоев, выполняемых на основании данных ГИС.

#### **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.**

При анализе современного рельефа или форм погребенных слоев важно с единых позиций формально устанавливать границы структурных элементов и оценивать степень их схожести на простые типовые формы. Решение этой задачи может достигаться вычислением мер сходства фрагментов исследуемых поверхностей с одним из пяти типов вращающихся анизотропных палеток (Рисунок 11).

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 покрывающий 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

$$r_{xy}(\alpha) * Scale, \quad (33)$$

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:

$$s_y r(\alpha)_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{1}. \quad (34)$$

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

Этот процесс иллюстрируется рисунками 12 и 13.

На рисунке 12а показаны вся карта анализируемого рельефа, его фрагмент, с которым в данный момент совмещена палетка типа



«талъвет» - 6.6б. На этом примере ориентация палетки составляет 30 градусов, это направление показано черной линией на рисунке 12б. Ортогональная к ней красная линия показывает ориентировку вертикальной плоскости, на которую проектируются точки рельефа и точки палетки, имеющие те же координаты. Точки палетки и рельефа (Рисунок 12в) при этой ориентировке палетки не обнаруживают статистической связи (коэффициент корреляции -0.02).

Рисунок 13 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, приведены состояния только для двух поворотов, максимальное значение коэффициента корреляции 0.938 (Рисунок 13а) получено при ориентации палетки -40 градусов относительно направления на север (положительное направление поворота – против часовой стрелки). При ориентации +30 градусов (Рисунок 12в), 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.

В качестве примера применения метода вращающихся анизотропных палеток к анализу форм рельефа приведем результаты вычислений для части территории Алтайского края и Новосибирской области, где 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-взброс, 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 14.

Для лучшего ориентирования, на рисунке 14а показана географическая карта местности с нанесенными на ней основными населенными пунктами, дорогами, руслами рек, озерами и лесными массивами. Карта 14b – показывает современный рельеф. Это поле высот, позволило вычислить с помощью асимметричной вращающейся палетки характеристическую функцию, локальной похожести данного поля на формы рельефа типа тальвег - карта 14с. 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.

Кроме того, есть особенности, которые не слишком бросаются в глаза на рисунке 14b, но которые хорошо заметны на рисунке 14с. Это система линияментов, 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 этих 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.

Выделяется необычная почти горизонтальная линейная зона изменений значений поля в центральной части карты 14с. 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.

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 отслеживаются 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 сейсмическим 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 применение данного метода на примере интерпретации карт времен отражающих горизонтов 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 керна, достигает 40%, а среднее значение составляет 28,8% (Тер-Саркисов, 1999).

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. Разрывные нарушения визуально проявляются здесь в виде серий уступов.

На основе карты изохор по кровле баженовской свиты, в целях выделения разрывных нарушений, выполнено вычисление угла наклона поверхности, а также степень схожести с палеткой типа «уступ». Результат, с использованием палетки 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.

Помимо этого, на тестовых примерах показана возможность обнаружения разрывных нарушений, амплитуда которых сопоставима с высокочастотными флуктуациями поверхности или случайными погрешностями. Вычисление градиентов или углов наклонов поверхности в данной ситуации оказывается значительно менее информативным.

## 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 схожесть фрагментов нескольких скважин. Именно использование 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 промышленные 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 сложных объектов, 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.

#### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

##### ***В изданиях, рекомендованных ВАК:***

1. **Лапковский В.В.** Использование цифровой обработки углов падения слоев для выделения и описания пликативных структур. / **Лапковский В.В.** // Геология и геофизика, 1983 - № 2 - С. 25-31.

2. Канарейкин Б.А. Построение структурных карт для гетерогенных складчатых моделей на ЭВМ. / Канарейкин Б.А., **Лапковский В.В.**, Свиньин В.Ф. // Геология и геофизика - 1984, № 4 - С. 88-98.

3. Муклыгин С.И. Восстановление функции двух переменных по значениям её косых производных в решении некоторых геолого-геофизических задач. / Муклыгин С.И., **Лапковский В.В.** // Геология и геофизика, 1985, № 8, - С. 110-113.

4. Федянин А.П. Комплексирование сейсморазведки и гравиразведки при поисках структур на Сибирской платформе. / Федянин А.П., Умперович Н.В., **Лапковский В.В.** // Геология и геофизика. 1985 - № 7 - С. 100-104.

5. **Лапковский В.В.** Автоматизированное стереоизображение опрокинутых складок. / **Лапковский В.В.**, Сребный С.А. // Геология и геофизика - 1986, № 9 - С. 126-131.

6. Канарейкин Б.А. Автоматизирование построения структурных карт для доюрских образований Западно-Сибирской плиты по данным сейсморазведки МОГТ. / Канарейкин Б.А., **Лапковский В.В.**, Мальцев А.И. // Геология и геофизика - 1988, № 2 - С. 81-91.

7. **Лапковский В.В.** Аппроксимация и преобразование геологических поверхностей, осложненных разрывами / **Лапковский В.В.** // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений - 2004, № 1, - С. 130-135.

8. Конторович В.А. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности келловей-волжских отложений Чузикско-Чижапской зоны нефтегазонакопления. / Конторович В.А., Бердникова С.А., Калинина Л.М., **Лапковский В.В.**, Поляков А.А., Соловьев М.В. // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений - 2006, №1 - С. 4-11.

9. Конторович В.А. Модель геологического строения и нефтегазоносность зоны контакта палеозойских и мезозойских отложений в Чузикско-Чижапской зоны нефтегазонакопления / Конторович В.А., Бердникова С.А., Калинина Л.М., **Лапковский В.В.**, Поляков А.А., Соловьев М.В. // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений - 2006, №5-6 - С. 91-102.

10. Филиппов Ю.Ф. Численное моделирование соляного тектогенеза в кембрийских отложениях Предьенисейского осадочного бассейна (Западная Сибирь) / Филиппов Ю.Ф., **Лапковский В.В.**, Лунев Б.В. // Геология и геофизика - 2009, т.50. N 2, - С.127-136.

11. Лунев Б.В. Быстрое численное моделирование соляной тектоники: возможность оперативного использования в геологической практике. / Лунев Б.В., **Лапковский В.В.** // Физическая мезомеханика - 2009, т. 12, N 1 - С. 63-74.

12. Конторович В.А. Тектоника и нефтегазоносность центральной части Александровского свода. / Конторович В.А., Калинина Л.М., **Лапковский В.В.**, Соловьев М.В., Бахарев А.Н. // Геология нефти и газа - 2011, № 5 - С. 119-127.

13. **Лапковский В.В.** Непрерывная сейсмостратиграфическая модель как основа структурной интерпретации разрезов МОГТ / **Лапковский В.В.** // Технологии сейсморазведки - 2012, № 4 - С. 33-39.

14. Конторович В.А. Структурно-тектоническая характеристика и модель геологического строения неопротерозойско-фанерозойских отложений Анабаро-Ленской зоны / Конторович В.А., Конторович А.Э., Губин И.А., Зотеев А.М., **Лапковский В.В.**, Малышев Н.А., Соловьев М.В., Фрадкин Г.С. // Геология и геофизика - 2013, т.54. N 8, специальный выпуск «Проблемы геологии и нефтегазоносности Арктики» - С. 1253-1274.

15. Конторович В.А. Автокаталитическое всплывание газонасыщенных пород как механизм формирования ловушек для уникальных газовых месторождений на севере Западной Сибири / Конторович В.А., Кожемякин И.Д., **Лапковский В.В.**, Лунёв Б.В. // Геология нефти и газа - 2014, № 1 - С. 50-57.

16. Конторович В.А. Модель формирования неокомского клиноформного комплекса Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции с учетом изостазии / Конторович В.А., **Лапковский В.В.**, Лунёв Б.В. // Геология нефти и газа - 2014, № 1 - С.65-72.

17. Конторович В.А. Численные модели формирования структур соляной тектоники, выявленных сейсморазведкой в кембрийских отложениях Предьенейского осадочного бассейна (юго-восток Западной Сибири). / В.А. Конторович, Б.В. Лунёв, **В.В. Лапковский**, Ю.Ф. Филиппов // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири - 2014, №2 - С. 105-115.

18. **Лапковский В.В.** Построение сеточных моделей сложнодислоцированных осадочных толщ / **Лапковский В.В.** // Геология нефти и газа - 2014, № 1 - С. 22-26.

19. Лунёв Б.В. Механизм развития инверсионной складчатости в подсолевом комплексе / Лунёв Б.В., **Лапковский В.В.** // Физика Земли - 2014, № 1 - С. 59-65.

20. **Лапковский В.В.** Корреляция разрезов скважин как многомерная оптимизационная задача / **Лапковский В.В.**, Истомин А.В., Конторович В.А., Бердов В.А. // Геология и геофизика - 2015, том. 56 - С. 624-630.

21. Развозжаева Е.П. Численное моделирование тектонической и термической истории Кындальского грабена Буреинского бассейна (Дальний Восток России) / Развозжаева Е.П., Прохорова П.Н., **Лапковский В.В.** // Тихоокеанская геология. – 2017. – Т. 36. – № 3. – С. 70-87.



22. Лунёв Б.В. Высокоэффективное 3-d моделирование соляного тектогенеза в целях прогноза структуры подсолевого комплекса / Лунёв Б.В., Абрамов Т.В., **Лапковский В.В.**, Приيمنко В.И. // Технологии сейсморазведки. – 2017, № 3.

23. **Лапковский В.В.**, Шмелев Н.Е., Лунёв Б.В. Обобщенный образ скважины по каротажным данным: технология создания и применения / **Лапковский В.В.**, Шмелев Н.Е., Лунёв Б.В. // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2018, № 1, [http://www.ngtp.ru/rub/11/11\\_2018.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/11/11_2018.pdf)

### *Рецензируемые, входящие в РИНЦ:*

1. Конторович В.А. Численные модели формирования структур соляной тектоники, выявленных сейсморазведкой в кембрийских отложениях юго-востока Западной Сибири / Конторович В.А., Лунев Б.В., **Лапковский В.В.**, Филиппов Ю.Ф. // Фундамент, структуры обрамления Западно-Сибирского мезозойско-кайнозойского осадочного бассейна, их геодинамическая эволюция и проблемы нефтегазоносности: Материалы II всероссийской науч. конф. с участием иностр. ученых (Тюмень, 27-29 апреля, 2010). - Новосибирск: Гео, 2010. - С. 103-106.

3. Бердов В.А. Выделение пластов межскважинного пространства по данным каротажа в программном комплексе Petrel. / Бердов В.А., Власов А.А., **Лапковский В.В.** // 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. 76-81.

5. Конторович В.А. Модель формирования бескорневых структур осадочных бассейнов в результате всплывания газонасыщенных пород. / Конторович В.А., Кожемякин И.Д., **Лапковский В.В.**, Лунёв Б.В. // ГЕО-Сибирь-2013: IX Международная конференция "Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых" (Новосибирск, 15-26 апреля 2013 г.). - Новосибирск: СГГА, 2013. - Т. 1. - С. 96-100.

6. Бердов В.А. Метод автоматической корреляции разрезов скважин по геофизическим данным в программном комплексе Petrel. / Бердов В.А., Власов А.А., **Лапковский В.В.** // ГЕО-Сибирь-2013: IX Международная конференция "Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых" (Новосибирск, 15-26 апреля 2013 г.). - Новосибирск: СГГА, 2013. - Т. 3. - С. 179-184.

7. Лунев Б.В. Развитие конвективной неустойчивости континентальной «гермической литосферы», как механизм формирования крупных осадочных бассейнов / Лунев Б.В., **Лапковский В.В.** // Материалы докладов конференции «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле», т.2, Москва, ИФЗ, 2016, С. 522-528.

8. Лунёв Б.В. Решение эволюционной обратной задачи для уточнения геологической структуры в областях соляной тектоники [Текст]/ Лунёв Б.В., **Лапковский В.В.**, Канаков М.С., Застрожных А.С. // Международная конференция "Вычислительная и прикладная математика 2017" (ВПМ 2017), Россия, г. Новосибирск 25.06 -14.07.2017, С. 136.

9. М.О. Федорович Результаты моделирования обстановок осадконакопления Усть-Енисейского района в ПО DIONISOS / М.О. Федорович, Л.М. Бурштейн, О. Емельяненко, С.В. Ершов, В.А. Конторович, **В.В. Лапковский**, Е. Маркина // Гео-Сибирь-2018: XIV Международная конференция "Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых" (Новосибирск, 23-27 апреля 2018 г.). - Новосибирск: СГГА, 2018.

10. **Лапковский В.В.** Оценка сходства поверхностей слоев с типовыми геоморфологическими и тектоническими формами / **Лапковский В.В.** // Гео-Сибирь-2018: XIV Международная конференция "Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых" (Новосибирск, 23-27 апреля 2018 г.). - Новосибирск: СГГА, 2018.

11. **Лапковский В.В.** Технология создания и применения обобщенного образа скважины по каротажным данным / **В.В. Лапковский**, Н.Е. Шмелев // Гео-Сибирь-2018: XIV Международная конференция "Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых" (Новосибирск, 23-27 апреля 2018 г.). - Новосибирск: СГГА, 2018.

Технический редактор Т.С. Курганова

---

Подписано в печать 17.09.2018

Формат 60x84/16. Бумага офсет №1. Гарнитура Таймс

Печ.л. 2,0. Тираж 154. Зак. № 175

---

ИНГГ СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3

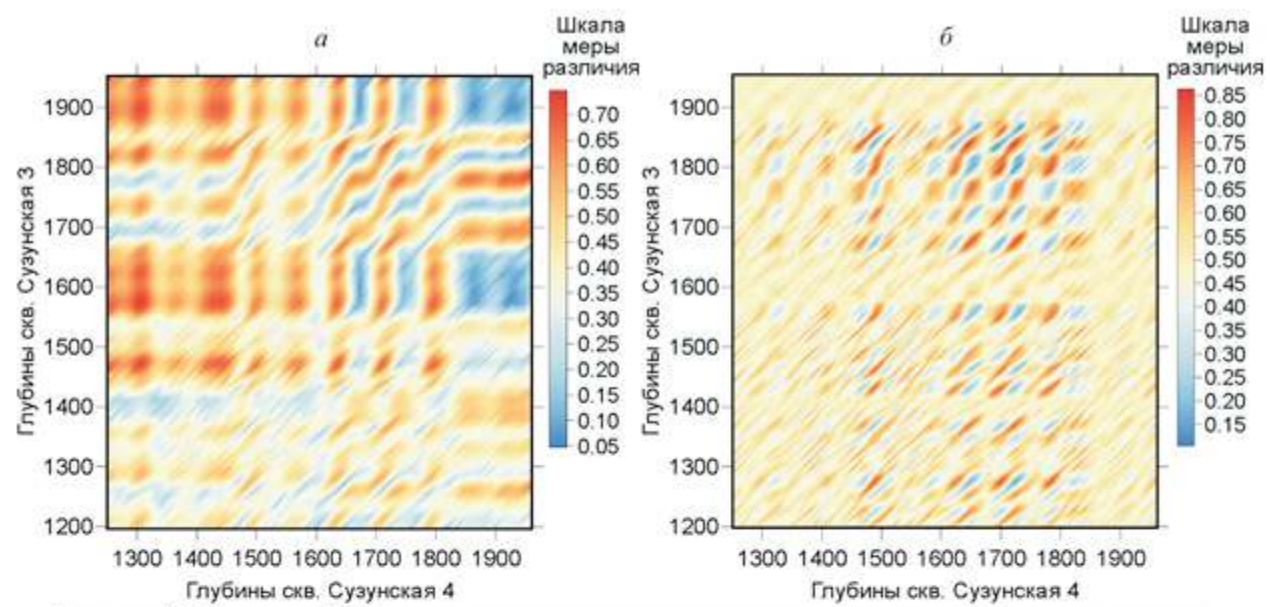


Рисунок 1 Планшеты Жековского, построенные для одних данных, но с разными типами мер различия. а – мера различия (5), б – мера различия (6)

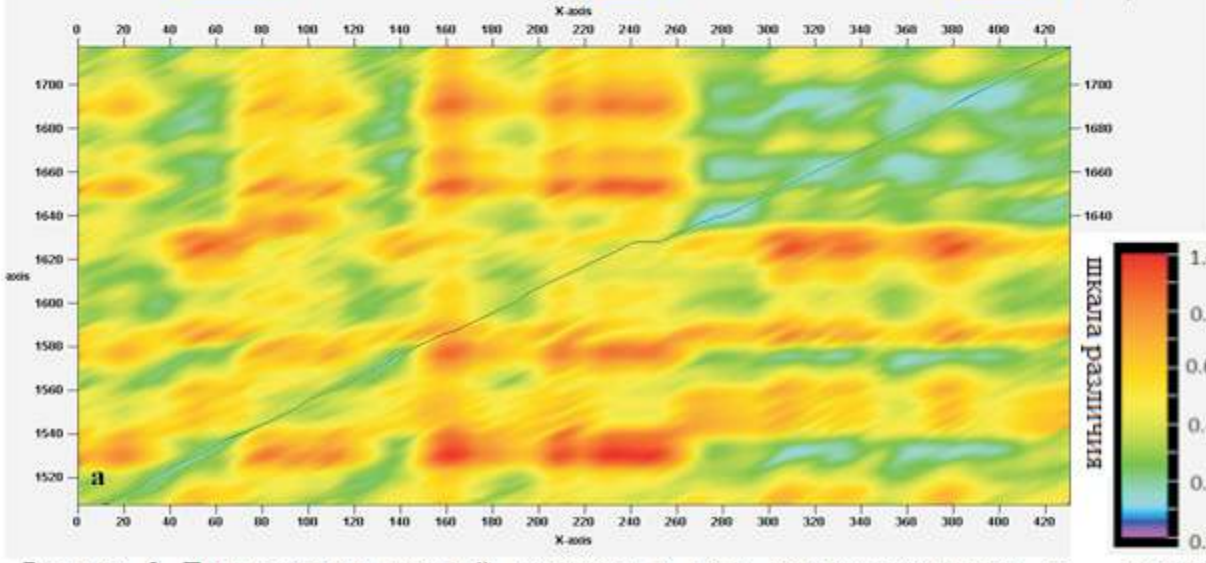
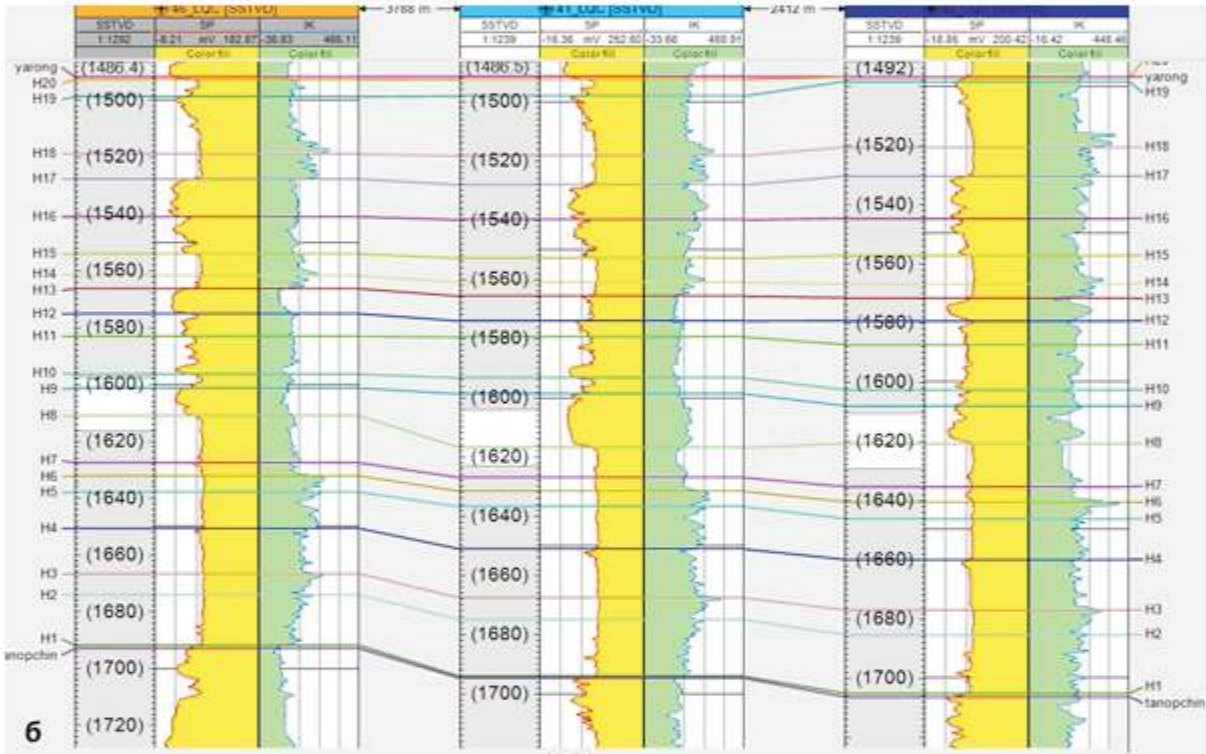


Рисунок 3 Присоединение третьей скважины к двум откоррелированным. а – планшет многомерной меры различия (по трем скважинам). По x – номера согласованных корреляционной моделью пар глубин первой и второй скважин. По y – глубины присоединяемой скважины. Черная линия – вариант оптимальной корреляции. б – результат присоединения третьей скважины (правая) к существующему решению на основе вычисления многомерной меры различия

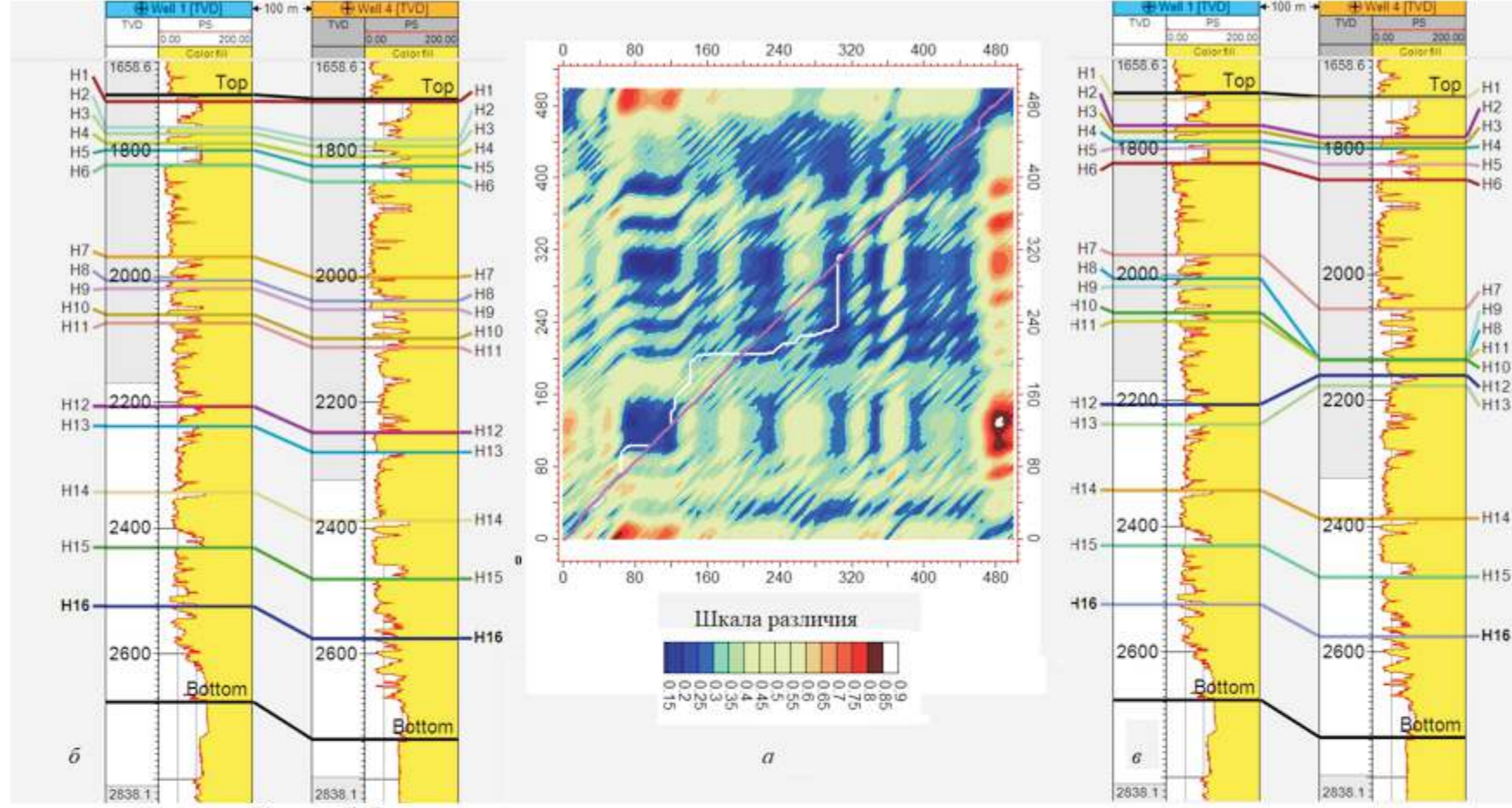


Рисунок 2 Варианты корреляции двух скважин; а – планшет меры различия и две оптимальные линии на нем, розовая решение оптимизационной задачи с минимумом функционала (8), белая – минимизирует функционал (11); б – схема корреляции, соответствующая розовой линии, в – схема корреляции, соответствующая белой линии

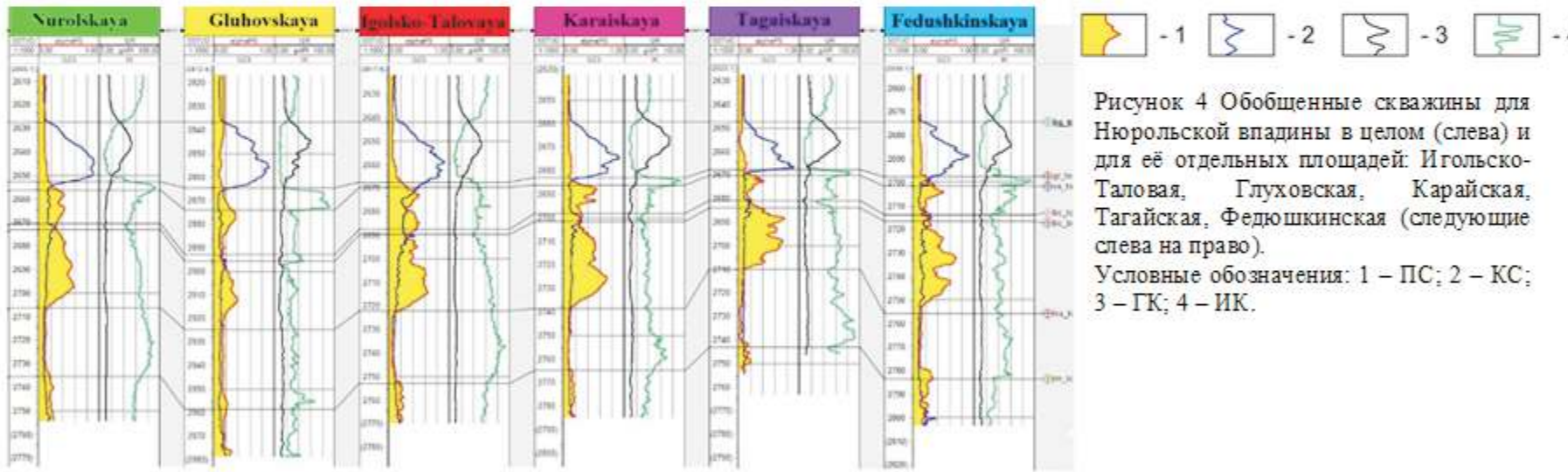


Рисунок 4 Обобщенные скважины для Нюрольской впадины в целом (слева) и для её отдельных площадей: Игольско-Таловая, Глуховская, Карайская, Тагайская, Федюшкинская (следующие слева на право).  
Условные обозначения: 1 – ПС; 2 – КС; 3 – ГК; 4 – ИК.

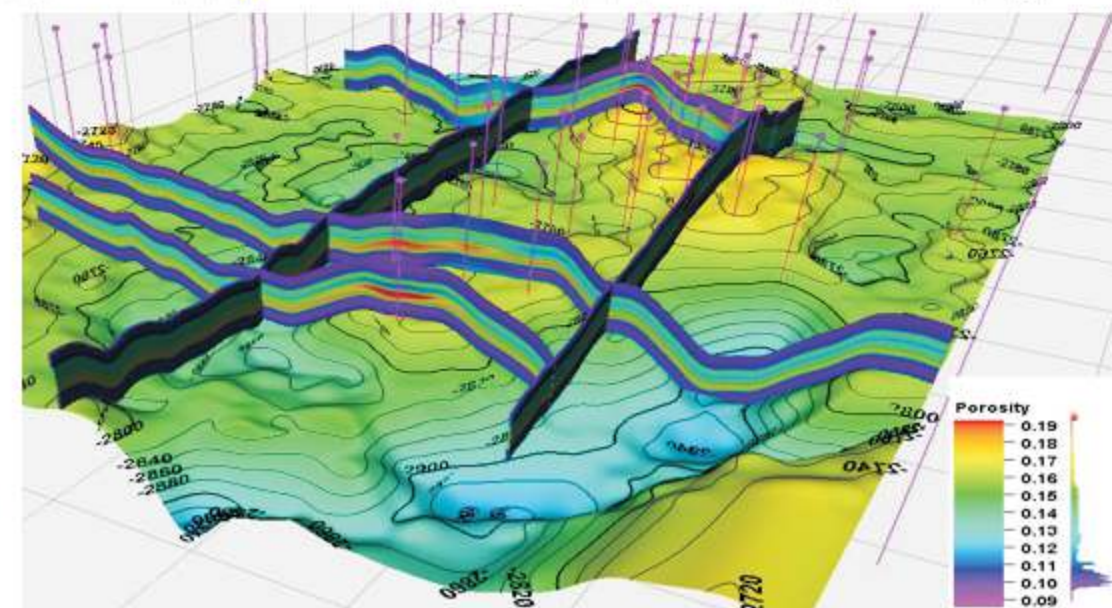


Рисунок 5 Куб пористости верхнеюрских отложений Нюрольской впадины, представленный набором сечений, и карта абсолютных отметок кровли тюменской свиты, район Игольско-Талового месторождения

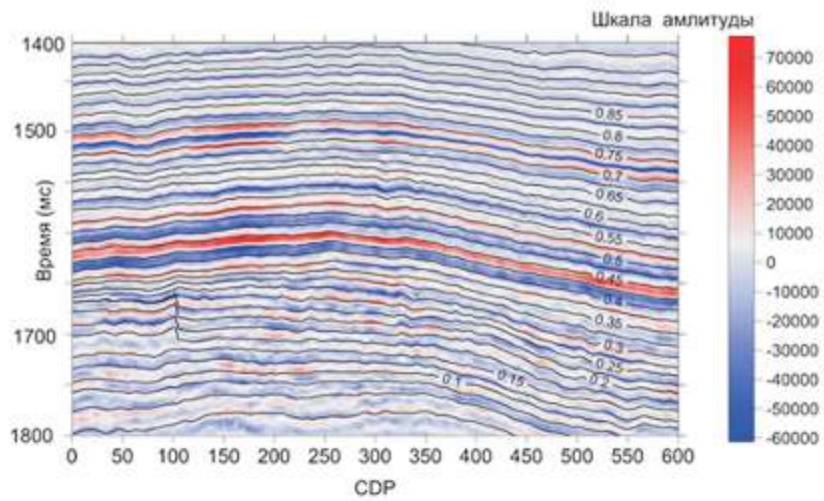


Рисунок 6 Временной сейсмический разрез с наложенными изолиниями непрерывной сейсмостратиграфической функции (сейсмостратиграфического параметра)

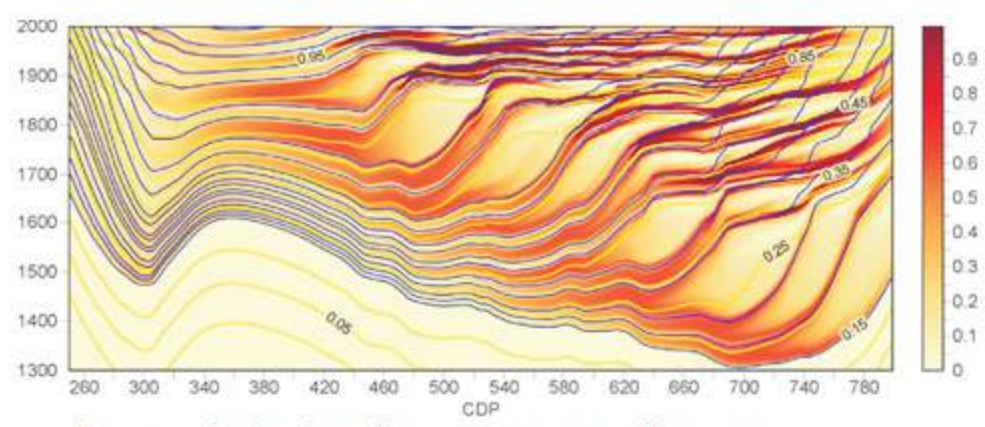


Рисунок 8 Глубинный разрез модели. Цветом показано распределение алевроитовой фракции, желтыми изолиниями – созданная сейсмостратиграфическая модель, а синими линиями – изохроны.

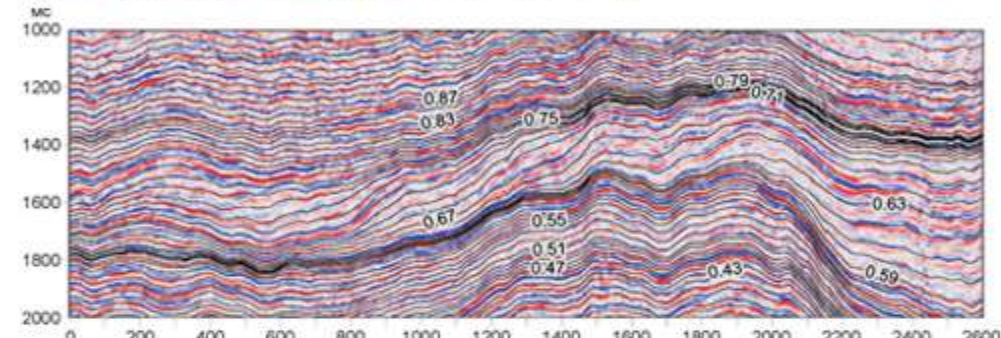


Рисунок 7 Временной сейсмический разрез области с клиноформным комплексом с наложенными изолиниями непрерывной сейсмостратиграфической функции

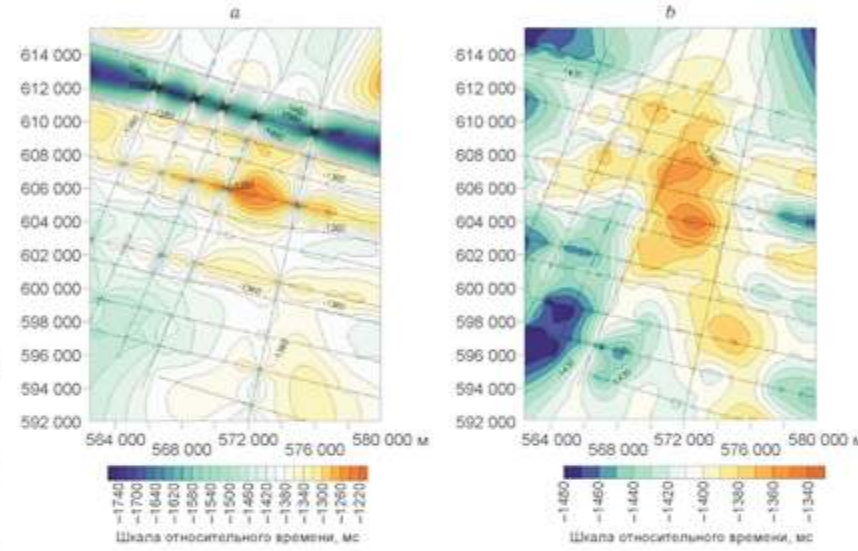


Рисунок 10 Карты времени регистрации для сейсмостратиграфической границы с параметром 0.4 в относительной шкале времен. а – построена без согласования моделей по крестовым точкам, б – построена с согласованием моделей по крестовым почкам. Тонкие черные линии – система профилей МОГТ.

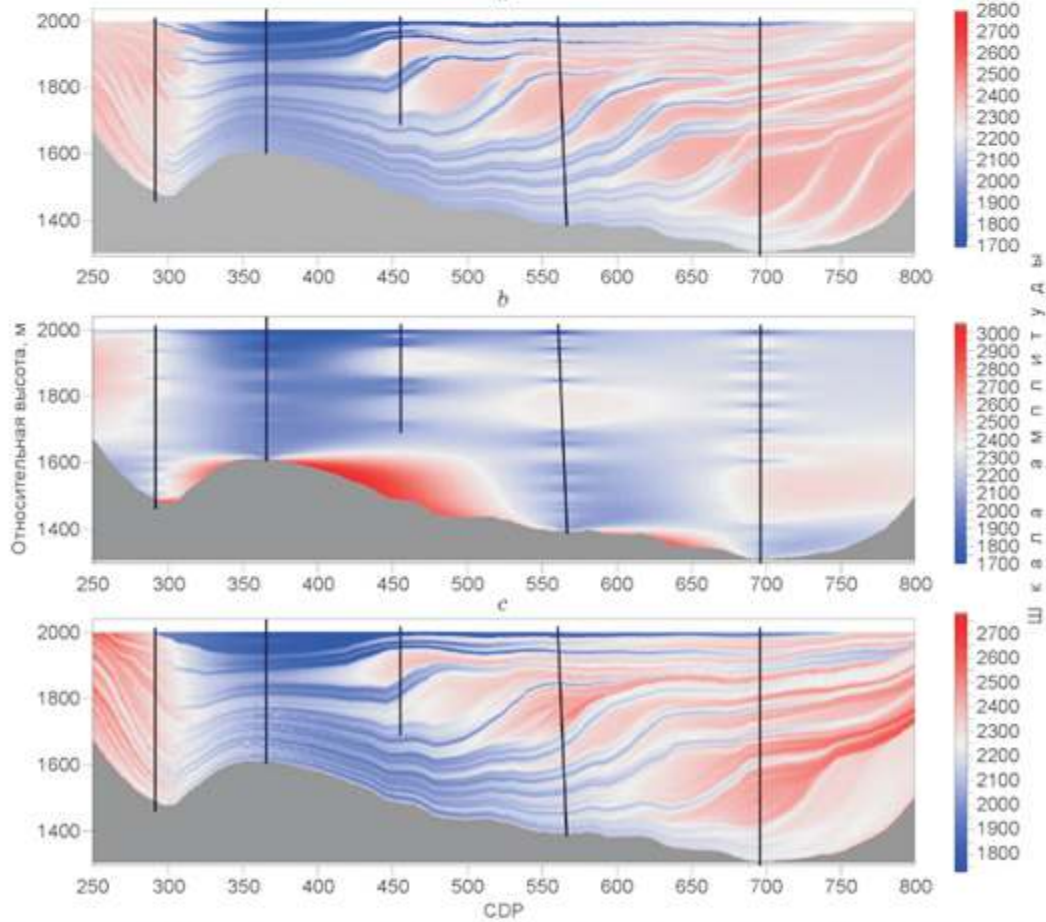


Рисунок 9 Пример построения разрезов распределения плотности пород по редким скважинным данным в осадочной толще. Тонкие черные линии – «скважины». а – истинное распределение плотности, б – распределение плотности построенное только по «скважинным» данным без использования сейсмостратиграфической модели, с – распределение плотности построенное по «скважинным» данным с использованием

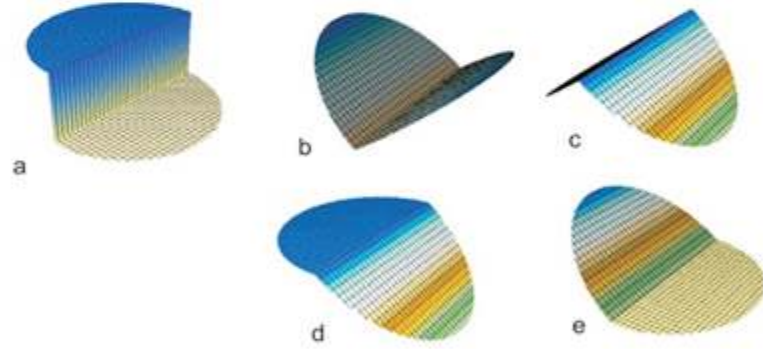


Рисунок 11 Типы вращающихся анизотропных палеток. а – уступ, б – тальвег, с – гребень, d – бровка террасы, е – тыловой шов террасы

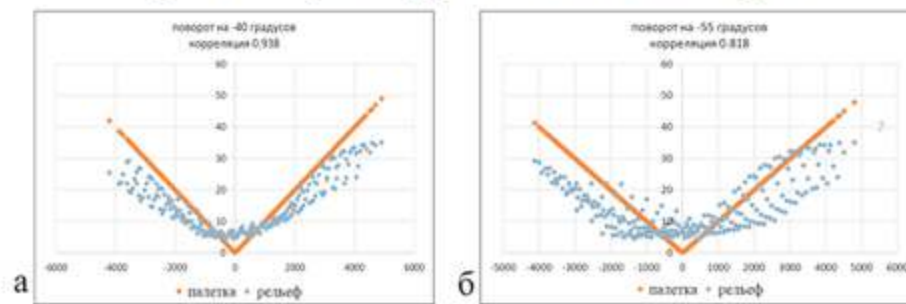


Рисунок 13. Изменение коэффициента корреляции рельефа и вращающейся палетки типа «тальвег»: а – ориентация палетки -40 градусов, б - ориентация палетки -55

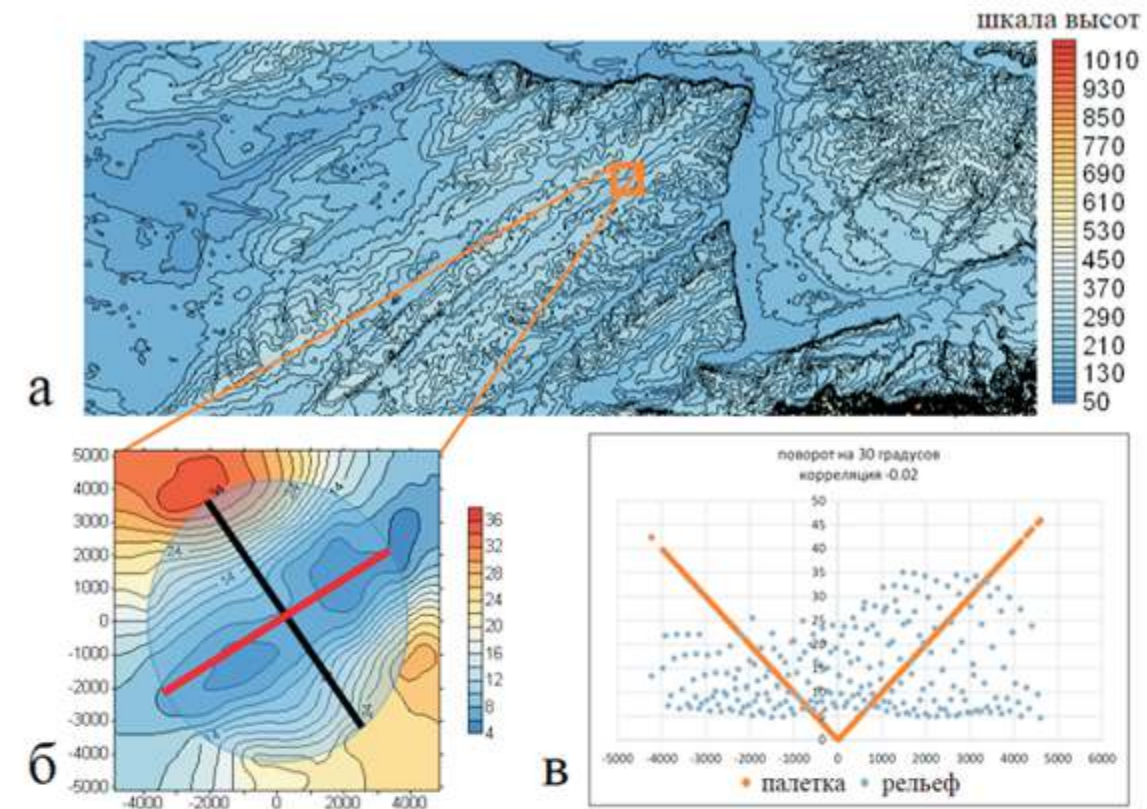


Рисунок 12 Принцип анализа рельефа с помощью вращающихся палеток. а – карта анализируемой поверхности рельефа, оранжевый квадрат – «скользящее окно», с которым в данный момент совмещена выбранная палетка; б – увеличенный фрагмент рельефа и палетка, покрывающая его (полупрозрачный круг), черная линия – 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.

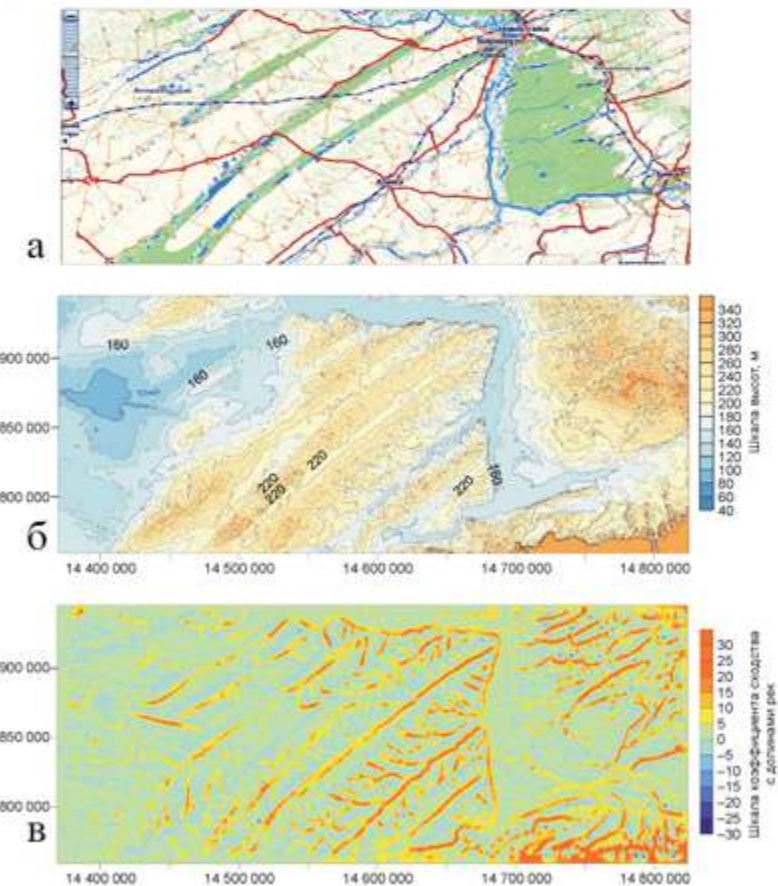


Рисунок 14 Рельеф зоны ленточных боров Алтая и карта коэффициентов сходства с речными долинами: а – копия фрагмента цифровой географической карты района (копия из Yandex); б – карта изолиний цифровой модели рельефа; с – карта коэффициентов подобия, построенная по цифровой модели рельефа