

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» (НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)

Факультет информационных технологий

Кафедра Систем Информатики

Направление подготовки: 230100 ИНФОРМАТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Магистерская программа: Компьютерное моделирование

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**КОРРЕЛЯЦИЯ ДАННЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ СИСТЕМЫ
СКВАЖИН В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ RETREL**

Бердов Валерий Алексеевич

Тема диссертации утверждена распоряжением по НГУ № 532 от 14 декабря 2014 г.

«К защите допущена»

Заведующий кафедрой, Лаврентьев М.М.

д.ф.-м.н., профессор

Научный руководитель

Лапковский В.В.

к.г.-м.н., ИНГГ СО РАН

Власов А.А.

к.т.н., ИНГГ СО РАН

Дата защиты: 17 декабря 2014 г.

Автор Бердов В.А.

Новосибирск, 2014г.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» (НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)
Факультет информационных технологий
Кафедра Систем Информатики

Направление подготовки: 230100 ИНФОРМАТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Магистерская программа: Компьютерное моделирование

УТВЕРЖДАЮ

Зав. Кафедрой Лаврентьев М.М.

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
МАГИСТЕРСКУЮ ДИССЕРТАЦИЮ

Студенту Бердову Валерию Алексеевичу

Тема: Корреляция данных геофизических исследований для системы скважин в программном комплексе Petrel

Исходные данные (или цель работы): Создание программного модуля, интегрируемого в среду Petrel с помощью технологии Ocean SDK, содержащего набор инструментов по созданию корреляционных моделей разрезов скважин в автоматическом режиме.

Структурные части работы: Ознакомиться с предоставляемыми возможностями для корреляции данных геофизических исследований в платформе Petrel. Разработать программное расширение и интегрировать его в Petrel. Протестировать работу реализованных методов, а также работу подключаемого модуля на предмет ошибок

Руководитель

Лапковский В.В.

к.г.-м.н., ИНГГ СО РАН

Власов А.А.

к.т.н., ИНГГ СО РАН

Задание принял к исполнению

Бердов В.А.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. Геофизические методы исследования и задача корреляции разрезов скважин	7
1.1 Геофизическое исследование скважин.....	7
1.2 Корреляция разрезов скважин.....	8
1.3 Порядок построения корреляционной модели	10
1.4 Трудности построения корреляционной модели разрезов скважин.....	10
1.5 Математическая постановка задачи корреляции скважин	11
1.5.1 Стратиграфическая модель как параметризованная линия.....	11
1.5.2 Геометрические свойства корреляционной линии.....	13
1.6 Существующие решения задачи корреляции и постановка задачи.....	15
Глава 2. Реализация программного расширения в платформу Petrel	17
2.1 Технология разработки плагинов Ocean SDK под платформу Petrel	17
2.2 Методы и их взаимодействие в программном модуле.....	18
2.3 Реализация алгоритмов для решения задачи корреляции разрезов скважин	20
2.3.1 Генерация парных сочетаний скважин.....	20
2.3.2 Построение планшета Жековского	22
2.3.2.1 Построение планшета Жековского для пары скважин	22
2.3.2.2 Построение планшета Жековского для группы из $n > 2$ скважин	23
2.3.3 Расстановка границ для корреляции.....	25
2.3.3.1 Ручная расстановка границ или использование корреляционной модели	25
2.3.3.2 Расстановка границ с заданным интервалом	25
2.3.3.3 Расстановка границ градиентным методом	25
2.3.3.4 Расстановка границ на основе вычисления дисперсии.....	26
2.3.3.5 Равномерная расстановка границ.....	27
2.3.4 Построение корреляционного решения на основе проективной модели	27
2.3.5 Построение корреляционного решения на основе волнового алгоритма Ли	29
Глава 3. Применение и результаты работы программного модуля.....	34

	4
3.1 Применение программного модуля	34
3.2 Результат работы программного модуля на экспериментальных данных.....	36
3.3 Производительность.....	38
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	39
ЛИТЕРАТУРА	40
ПРИЛОЖЕНИЕ А	43

ВВЕДЕНИЕ

Работа выполнена в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН).

В процессе исследования верхних слоев земли на предмет наличия углеводородных полезных ископаемых важную роль играют методы геофизического исследования скважин (ГИС). Данные, полученные в ходе их применения, дают ключевую информацию о внутреннем строении месторождения и позволяют детально изучить околоскважинное пространство. Кроме того с их помощью также можно построить корреляционную модель разрезов скважин, определяющую пространственное распределение пластов породы в исследуемом интервале. Этот метод заключается в выделении слоев породы на основании данных ГИС и их идентификации в исследуемых скважинах. Результаты стратиграфической корреляции имеют определяющее значение при оценке пространственного распределения свойств горных пород и подсчете запасов месторождения.

Однако, большинство современных программных продуктов, специализацией которых является обработка данных полученных с месторождений, не предоставляют пользователем никакого функционала для автоматического построения корреляционных моделей. В их число входит и такой программный продукт как Petrel, разработанный крупнейшей нефтесервисной компанией Schlumberger, основным назначением которого является построение и визуализация геологической модели среды месторождения углеводородов.

Реализации данного метода посвящена настоящая работа. Её целью является создание программного модуля интегрируемого в среду Petrel с помощью технологии Ocean SDK, на основе накопленного опыта в ИНГГ СО РАН и работ В.В. Лапковского и А.А Истомина [21, 22]. Готовое программное решение предоставит пользователям продукта Petrel инструменты по созданию корреляционных моделей разрезов скважин в автоматическом режиме недоступные им ранее. С его помощью можно строить корреляционные решение с нуля, задав при этом тип используемых геофизических измерений, а также интервалы исследования, в качестве которых также могут выступать известные стратиграфические уровни, либо доопределять незаконченные корреляционные модели, используя один из двух методов:

- Построение корреляционного решения на основе волнового алгоритма Ли;
- Построение корреляционного решения на основе проективной модели.

Для достижения поставленной цели, работа была разделена на следующие этапы:

- Анализ методов корреляции межскважинного пространства и их программных реализаций;
- Разработка алгоритмов на языке C++:
 - Генерация пар скважин;
 - Генерация планшетов мер различия;
 - Автоматическая расстановка границ;
 - Корреляция скважин на основе волнового алгоритма Ли;
 - Корреляция скважина на основе проективной модели Хейтса.
- Разработка интерфейса программного модуля;
- Разработка программного расширения к системе Petrel на языке программирования C# с применением технологии Ocean SDK;
- Оценка качества работы методов на тестовых наборах данных;
- Разработка справочных материалов по работе с программным модулем.

Настоящая работа состоит из трех глав и одного приложения. Первая глава посвящена анализу предметной области. В ней представлена информация о проведении разведывательных работ методами ГИС исследований, также описана необходимость автоматического построения корреляционных моделей при разработке месторождений полезных ископаемых, способы и подходы с помощью которых достигается разрешение задачи корреляции разрезов скважин. Вторая глава содержит описание технической части работы: технология разработки программных расширений для платформы Petrel, архитектура программного модуля, принципы работы реализованных алгоритмов, взаимосвязь представленных алгоритмов. Третья глава содержит в себе анализ предоставленных решений, их сравнительные характеристики, а также результаты работы алгоритмов на тестовых наборах экспериментальных данных. Приложение содержит описание интерфейса и порядок работы с представленным программным решением.

Глава 1. Геофизические методы исследования и задача корреляции разрезов скважин

Геофизические методы исследований — это научно-прикладной раздел геофизики, предназначенный для изучения верхних слоев Земли, поисков и разведки месторождений полезных ископаемых [10]. Геофизические методы основаны на выявлении аномалий физических полей, обусловленных неоднородностями геологического строения, связанных с изменением физических свойств и геометрических параметров слоев породы. При этом возникновение аномалий связано с тем, что объект поисков, либо сам создает поля в силу естественных причин, либо искажает искусственное поле вследствие различий физических свойств, например, отражение упругих волн от контактов разных толщ. Измерив те или иные физические параметры можно судить о свойствах пород и о геологическом строении района исследований.

1.1 Геофизическое исследование скважин

Геофизические методы исследования скважин - это комплекс физических методов, используемых для изучения горных пород в околоскважинном пространстве. Основным методом ГИС измерения является каротаж.

Каротаж - это исследование горных пород околоскважинного пространства электрическими, магнитными, радиоактивными, акустическими и другими методами, осуществляемыми с помощью специальной аппаратуры – каротажный зонд. Данные методы исследования скважин предназначены для изучения геологического разреза и, в частности, выявления пластов разной литологии, выделения и оценки запасов полезных ископаемых в разрезах, а также оценки пористости, проницаемости, коллекторских свойств окружающих пород и их возможной нефтегазоносной продуктивности. Эффективность скважиной геофизики очень велика, особенно в газонефтяной геологии, где бурение скважин сопровождается проведением геофизических исследований [23, 24].

Сущность любого геофизического метода состоит в измерении вдоль ствола скважины некоторой величины, характеризующейся одним или совокупностью физических свойств горных пород, пересеченных скважиной (рис. 1). Физические свойства пород связаны с их геологической характеристикой, и это позволяет по результатам геофизических исследований судить о пройденных скважиной породах [9].

Одним из преимуществ ГИС является то, что эти методы позволяют более эффективно организовывать разведку и эксплуатацию месторождений. Они обеспечивают уменьшение отбора образцов породы (керна) при бурении, сохраняя при этом ту же информативность о разрезе, сокращая при этом стоимость и время бурения, кроме того результат, получаемый в ходе измерений, позволяет изучать объект в его естественных условиях. В результате ГИС строятся каротажные диаграммы, характеризующие изменения того или иного физического параметра от глубины.

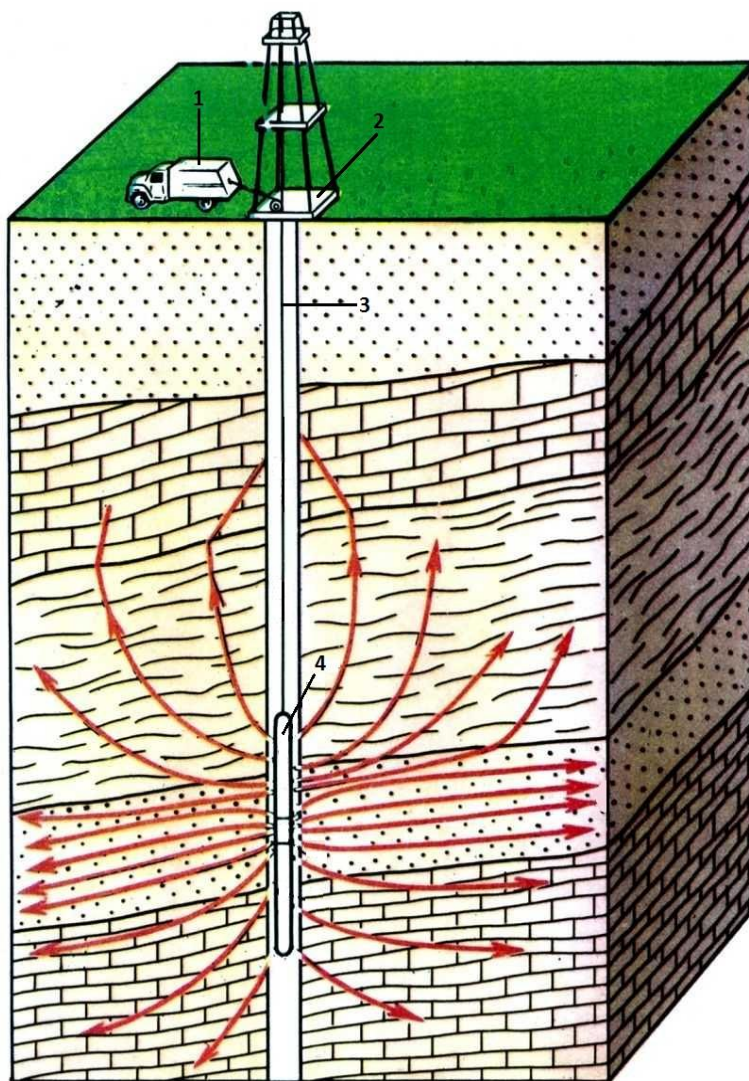


Рис. 1. Схема проведения ГИС: 1 – каротажная станция; 2- буровая вышка; 3 – кабель; 4 – каротажный зонд.

1.2 Корреляция разрезов скважин

Данные, полученные в процессе ГИС исследований, в дальнейшем проходят обработку и интерпретацию в ходе которой, в частности, строится модель геологического строения месторождения. Для построения этой модели решается задача корреляции разрезов скважин. Суть данного метода заключается в выделении слоев разного литологического состава на основе геолого-геофизических данных и сопоставлении разрезов скважин с целью идентификации этих слоев в различных скважинах.

В зависимости от решаемых задач различают региональную и локальную корреляцию. Региональную корреляцию проводят с целью выяснения геологического строения всей вскрытой бурением толщи горных пород. Поэтому при региональной корреляции рассматриваются разрезы скважин в целом от устья до забоя. Её цель –

выделить и проследить по площади опорные реперы, разделяющие разные комплексы пород. При региональной корреляции геологические границы проводят по стратиграфическим признакам.

Локальную корреляцию проводят для полного и всестороннего изучения строения продуктивного пласта, чтобы получить данные для составления документов, необходимых для определения объемов залежей, оценки неоднородности продуктивных пластов и проектирования системы разработки месторождений. От результатов локальной корреляции во многом зависят достоверность оцениваемых запасов нефти и газа, обоснованность принимаемой системы разработки и надежность планируемого конечного коэффициента нефтеизвлечения.

В зависимости от литологического состава продуктивной толщи корреляцию

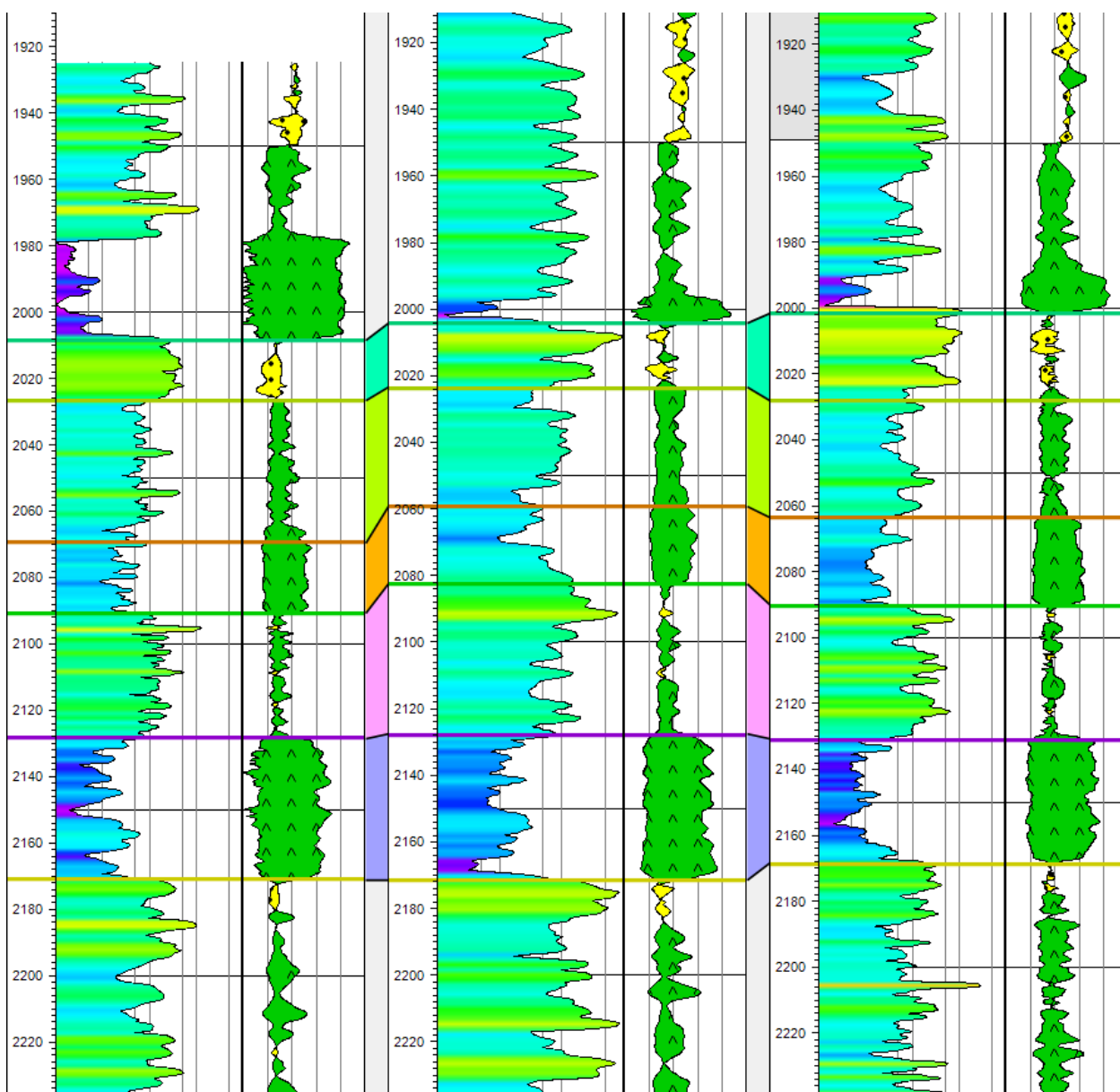


Рис. 2. Корреляция скважин по данным каротажного зондирования в платформе Petrel.

выполняют либо по материалам стандартного каротажа – методы КС (кажущееся сопротивление), ПС (метод естественной поляризации) и др. для терригенного песчано-глинистого разреза, либо по радиоактивному каротажу – методы ГК (гамма-каротаж) и НГК (нейтронный гамма каротаж) и др. для карбонатного разреза.

Результаты стратиграфической корреляции являются очень важным геологическим документом. С их помощью выясняется последовательность осадконакопления; определяются изменения мощности одноименных пластов, их литология и характер литолого-фациальной изменчивости; выявляются поверхности несогласия (рис. 2). На основе корреляционных схем составляются геологические профили, структурные карты и карты мощностей, литолого-фациальные карты, пластовые карты и другие графические документы. Кроме того корреляционная модель позволяет уточнять данные сейсмических исследований месторождения. Они в свою очередь также используются для изучения внутреннего строения Земли, её структуры на разных глубинах, прослеживания пластов породы на месторождении. Однако, погрешность измерений полученных в результате сейсморазведки значительно превышает ГИС методы. В совокупности эти данные представляют наиболее полную информацию о структуре месторождения.

1.3 Порядок построения корреляционной модели

При построении корреляционной модели в первую очередь определяется продуктивные толщи во всем разрезе скважины, для которых необходимо построить корреляцию. После чего устанавливается последовательность размещения скважин на схеме сопоставления и на минимальном расстоянии от продуктивного пласта выбирается основной репер, по кровле или подошве которого выравнивают сопоставляемые разрезы скважин. Кроме основного репера в разрезах скважин желательно иметь дополнительные реперные пласты, дающие возможность вести контроль и анализ мощностей вмещающих пород, что особенно важно при вероятности наличия стратиграфических и других несогласий. Затем уже проводятся работы по выделению границ пластов и идентификации их в исследуемых скважинах.

1.4 Трудности построения корреляционной модели разрезов скважин

Решение задачи построения корреляционной модели повсеместно встречается при разработке месторождений углеводородов и, как правило, выполняется вручную интерпретаторами. При этом, если число скважин на месторождении, исчисляется десятками или сотнями, то построение согласованной корреляционной модели становится задачей весьма трудоемкой, требующей многодневных усилий опытного специалиста. Для некоторых же месторождений число скважин, которые следовало бы учитывать при

стратиграфическом моделировании, слишком велико для традиционных методов анализа и может достигать нескольких сотен или тысяч. Для современных программных продуктов специализирующихся на обработке ГИС данных, подобное число скважин просто физически невозможно отобразить. Решения же по ограниченной совокупности скважин могут оказаться не полными и не достаточно точными для построения на их основе детальных моделей залежей. Кроме того, построение корреляционной модели, помимо большого объема данных, само по себе является сложной задачей, требующей учитывать порядок осадконакопления в исследуемых скважинах. Также нельзя игнорировать тот факт, что при проведении измерительных работ на результат оказывают влияние техногенные и природные условия. Вследствие чего измерения в одной и той же скважине могут иметь разный характер, что накладывает определенные трудности при составлении согласованной корреляционной модели залежи. В этой связи, особую значимость приобретает разработка эффективных компьютерных технологий принятия стратиграфических решений.

1.5 Математическая постановка задачи корреляции скважин

1.5.1 Стратиграфическая модель как параметризованная линия

Решение задачи корреляции предполагает идентификацию слоев одного литологического состава и/или возраста в исследуемых скважинах, это означает, что для построения согласованной корреляционной модели необходимо умение сравнивать различные участки скважин и делать выводы об их сходстве и различии.

Первые попытки разрешения этой задачи и создания соответствующих программ предпринимались с 60-х годов прошлого века. Значительная часть предложенных решений, ограничивалось взаимной идентификацией геологических тел или границ при парном сопоставлении двух скважин и построении для них диаграмм, отображающих различие между разными участками скважин на основании данных каротажных измерений. Впервые, использовать данный вид диаграммы, предложил Б.Жековский в работе 1963г. [18]. Эта работа была опубликована в виде короткой статьи в издании временного библиотечного хранения и сейчас она практически не доступна.

Для построения диаграммы (планшета) Жековского по оси x – откладываются глубины одной из сопоставляемых скважин, а по оси y – другой. При этом в обеих скважинах должны существовать данные по одному и тому же типу каротажных измерений. После чего результат сопоставления двух проб из разных скважин может быть вынесен на планшет в виде точки, охарактеризованной мерой различия для этих проб. Таким образом, сделав сопоставления для каждого участка одной скважины с участками

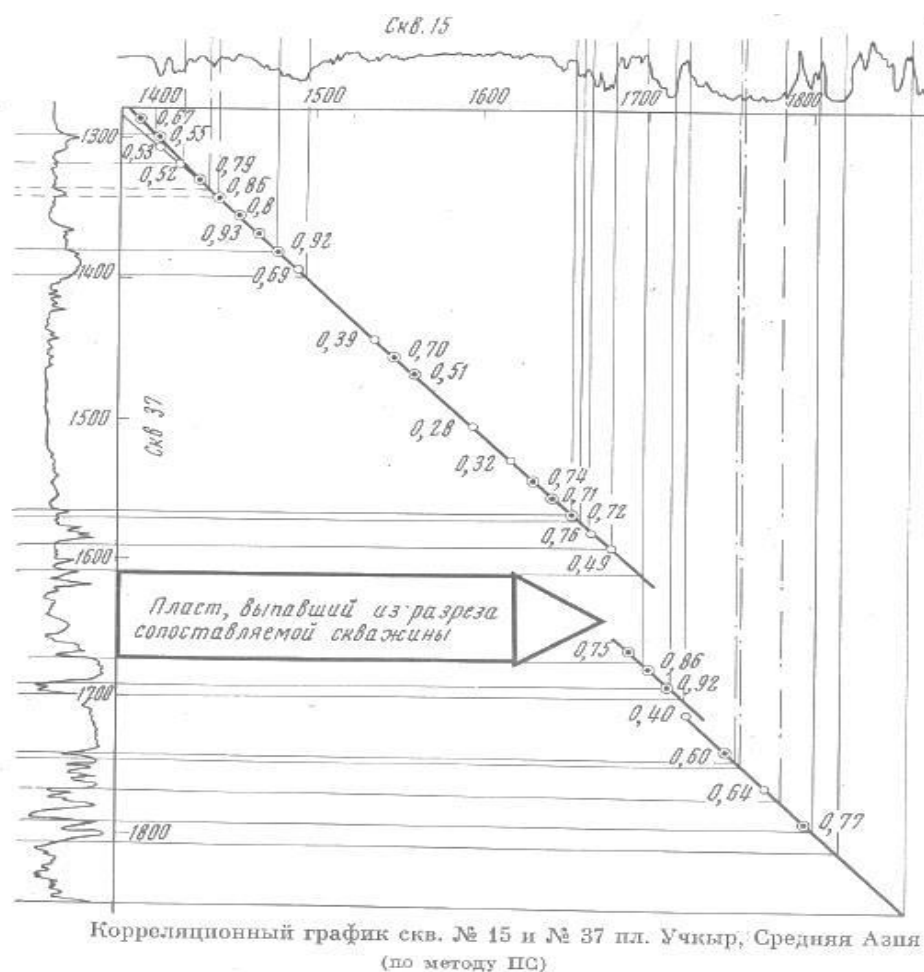


Рис. 3. Планшет Жековского. Копия рисунка из статьи Ш.А. Губермана [13].

другой, имеем непрерывную двумерную функцию, характеризующую различие любых фрагментов двух сопоставляемых скважин (рис. 3). В дальнейшем построение диаграмм Жековского предлагалось перенести на случаи использования 3 и более скважин, в результате которых получались многомерные планшеты меры различия.

Позже подход Б.Жековского был использован в работах Ш.А.Губермана [13, 14], а также он получил развитие в работах В.Ф. Гришкевича [11, 12]. Он предложил представить корреляционную модель в виде линии на диаграмме меры различия. Для более простого изложения временно ограничимся двумерным случаем, когда в корреляции участвуют только две скважины. В этих условиях стратиграфически эквивалентные значения глубин в скважинах образуют вектор из двух значений, таким образом, представляя на диаграмме Жековского точку в двумерном пространстве. Соответственно упорядоченный набор стратиграфических границ образует на планшете упорядоченный набор точек, соединив которые получится линия, где каждая точка соответствует определенному стратиграфическому уровню (рис. 3). Таким образом, построение корреляционной модели свелось к поиску кривой, проходящей через

минимальные значения функции меры различия (локальные минимумы, седловые точки). Для более сложных случаев, когда в корреляции участвует более двух скважин (n-скважин), суть подхода остается прежней с тем лишь исключением, что теперь мы имеем дело с n-мерным планшетом меры различия и соответственно n-мерной корреляционной кривой. В данной ситуации даже для небольшого количества скважин

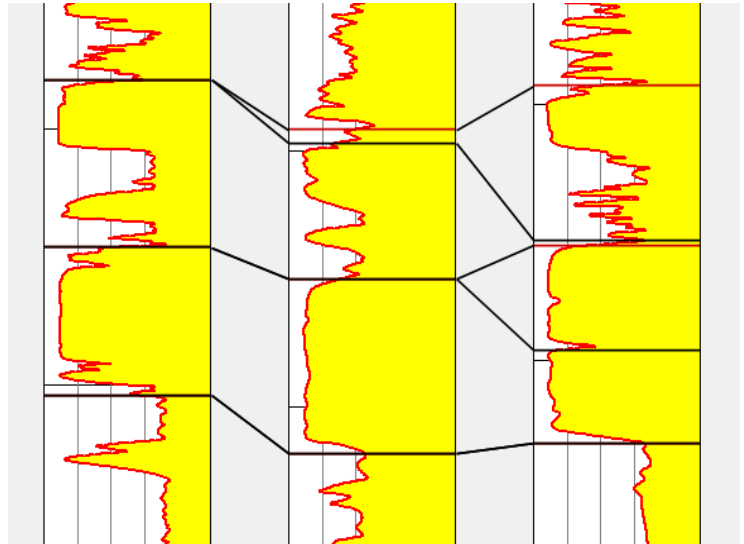


Рис. 4. Два варианта корреляции скважин в программной среде Petrel.

сложность задачи резко возрастает и возрастает степень неопределенности в выборе решения. Например, для трех скважин область решения представляет собой куб, а точки корреляционной линии состоят из трех координат – глубины по каждой из сопоставляемых скважин. И выбор правильного решения не всегда бывает очевидным. Так на рис. 4 представлено несколько вариантов корреляции, каждая из которых имеет право на существование.

На основе этих подходов и решая корреляционную задачу для случая с двумя скважинами можно легко построить модель для группы из любого количества скважин, организованную в виде разреза, когда каждая скважина, кроме первой и последней в списке, имеет по одному соседу слева и одному - справа. Однако, из-за неоднозначности построений такого рода разрезов скважин можно получить разные варианты корреляции. В данной ситуации сложности возникают при построении непротиворечивого и оптимального решения для всей группы скважин, а не для парного сопоставления отдельных скважин. Именно на преодоление этих трудностей направлены более поздние работы, которые базируются на построении локальных гранично-согласованных корреляционных решений с использованием триангуляционных сеток.

1.5.2 Геометрические свойства корреляционной линии.

Решая задачу корреляции разрезов скважин в виде кривой на планшете Жековского, мы неизбежно будем сталкиваться с различными геологическими структурами породы. В этой части представлено как будут себя вести эти линии в различных геологических ситуациях. Для более наглядного понимания, результаты представлены для двумерного

случая, когда используются только две скважины. Каждая точка линии в этом случае содержит вектор из двух значений соответствующие соответственно глубинам первой и второй скважины [22].

- Согласно залегание геологических границ. В этом случае корреляционная линия непрерывна, она не имеет горизонтальных или вертикальных участков, а её наклон определяется характерным соотношением мощностей слоёв в коррелируемых скважинах;
- Локальные перерывы в осадконакоплении (выклинивание слоев). При выклинивании слоев мы будем иметь горизонтальные или вертикальные участки

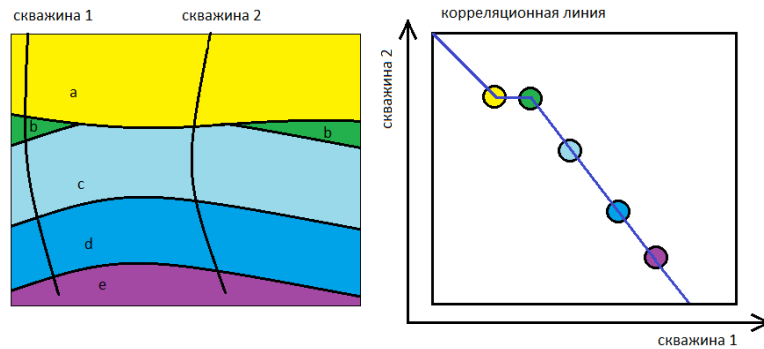
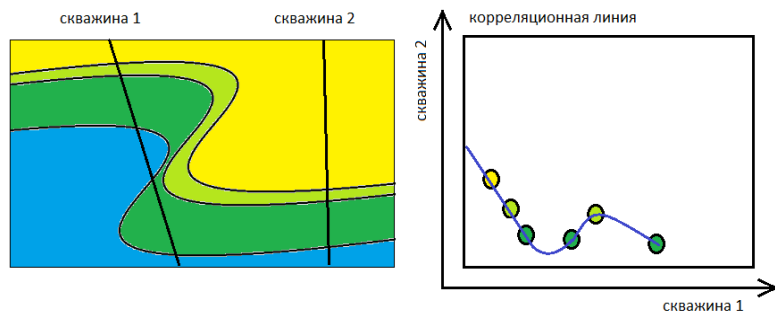


Рис. 5. Локальные перерывы в осадконакоплении.

корреляционной линии (рис. 5);

- Удвоение разреза в зоне надвига. В этом случае граница пластов а и б дважды встречается в первой скважине. Соответственно, одной точке скважины 2 будут соответствовать две точки скважины 1. Корреляционная линия оказывается разорванной (рис. 6);
- Пересечение одной из скважин складки с опрокинутым залеганием слоев. Корреляционная линия остаётся непрерывной, однако, из-за того, что скважина, пересекающая опрокинутую складку, встречает одну стратиграфическую границу несколько раз на разной глубине, корреляционная линия перестает быть

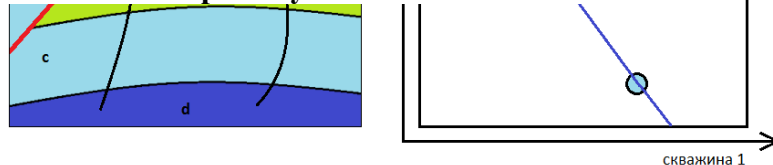
(рис. 7);



МОНОТОННО
убывающей

Предложенное

Рис. 7. Опрокинутое залегание слоев.



решение

Рис. 6. Удвоение разреза в зоне надвига.

корреляции скважин рассматривает только два случая залегания полезных ископаемых: согласное залегание пород и залегание с локальными перерывами в осадконакоплении. Более сложные структуры труднее формализовать и выявить при анализе каротажных диаграмм.

1.6 Существующие решения задачи корреляции и постановка задачи

В настоящее время большинство современных программных продуктов, специализацией которых является обработка и интерпретация данных, полученных в ходе разработки месторождений углеводородов, не имеют в своем наличии никакого функционала для автоматического построения корреляционных решений для систем скважин. Среди них существует лишь два продукта, в которых решена задача автоматической многомерной корреляции для большого числа скважин по данным ГИС – это DV Geo[19, 20] и AutoCorr[15, 16, 17].

В основе решений предлагаемых DV Geo и AutoCorr используется один и тот же подход – корреляционное сопоставление пар скважин, находящихся на одном ребре графа, получаемого путем триангуляции положения скважин на плоскости. Парные сопоставления приводят к возникновению невязок, с которыми затем приходится бороться. Эти невязки возникают из-за того, что двигаясь по ребрам графа от одной скважине к другой и прослеживая в них стратиграфические границы, можно выбрать разные маршруты, которые иногда приводят к существенно отличающимся решениям. Для согласования всех парных сопоставлений в непротиворечивую корреляционную модель в системе DV Geo предлагается сложный алгоритм локального исправления вариантов корреляции по общим треугольникам. В программном продукте AutoCorr возникновение существенных невязок определяются в процессе построения, соответствующие ребра графа маркируются цветом на планшете и специалисту предлагается в ручном режиме разрешить имеющиеся конфликты парных сопоставлений [15, 16, 19].

Что касается лидера в производстве программных решений, покрывающих практически весь спектр геолого-геофизических и эксплуатационных задач, от разведки месторождения до мониторинга добычи, компании Schlumberger, то предоставляемые ей продукты не имеют в своем наличии инструмента, с помощью которого можно было бы создавать корреляционные схемы в автоматическом режиме. В частности таким программным продуктом является среда Petrel, предоставляющая пользователям возможность построения корреляционных моделей в ручном режиме.

В данной работе предлагается решение, не допускающее возникновение невязок, посредством использование многомерных мер различия при сравнении скважин. Суть данного подхода состоит в том, чтобы на основании изначально построенных парных мер различия сравниваемых фрагментов разрезов скважин, конструируется многомерная функцию различия, позволяющая сравнить каждую скважину одновременно со всей совокупностью окружающих её скважин и оптимизировать корреляционное решение на основе минимизации такого различия.

Таким образом, задача настоящей работы состоит в том, чтобы разработать необходимый функционал, используя опыт и знания, накопленные в ИНГГ СО РАН, и интегрировать его в программную среду Petrel с помощью технологии Ocean SDK, предоставленные на правах сотрудничества Новосибирского государственного университета (НГУ) и ИНГГ СО РАН с нефтесервисной компанией Schlumberger.

Глава 2. Реализация программного расширения в платформу Petrel

2.1 Технология разработки плагинов Ocean SDK под платформу Petrel

Petrel – программная платформа, предназначенная для построения и визуализации единой геологической модели среды нефтегазового месторождения. Данная платформа, разработанная компанией Schlumberger, позволяет интегрировать в неё программные модули, позволяющие расширить функционал этого программного обеспечения для решения профильных задач определенных областей.

Разработка программных модулей ведется на платформе .NET с использованием языка программирования C#, а также с помощью интерфейса программирования приложений Ocean SDK. Ocean SDK – это инструментальная среда разработки программного обеспечения, которая базируется на современной технологии Microsoft .NET и использует язык программирования C#. Она состоит из набора динамически подключаемых библиотек, содержащих средства по управлению объектами программной платформы Petrel и предназначена для разработки расширений для неё. Ocean SDK позволяет ускорить разработку и внедрять инновации в целях решения актуальных задач отрасли.

Готовый программный модуль представляет собой динамически подключаемую библиотеку, содержащую реализацию алгоритмов, которые далее будут использоваться в платформе Petrel. Регистрация модуля в платформе происходит посредством распаковки заранее созданного установочного файла формата .pip (plug-in installer package) и указанием путей к модулю в конфигурационном файле программы посредством приложения Ocean Plug-in Manager, после чего функционал реализованного модуля будет доступен внутри Petrel.

Для реализации настоящего программного модуля была выбрана среда разработки Microsoft Visual Studio.

Структура данного программного расширения состоит из двух частей. Первая часть написана на языке C++ и представляет собой динамически подключаемую библиотеку, содержащую реализацию алгоритмов модуля. Вторая часть – написана на языке C# и является непосредственно программным расширением, встраиваемым в платформу Petrel. Данный программный модуль управляет объектами данных, представленными в Petrel, используя при этом библиотеки Ocean SDK, а также реализацию алгоритмов написанных в вычислительных библиотеках на C++. Такое решение по структуре программного модуля было принято в связи с необходимостью увеличения производительности работы алгоритмов, возможностью использования технологий распараллеливания программ с

помощью технологии openMP, а также для переиспользования вычислительной библиотеки для реализации расширений в других программных средах.

Сборка программного модуля имеет 64-х битную реализацию, поскольку среда Petrel предусматривает только такой формат установки и поддержки программных расширений. В соответствии с рисунком 8 структура модуля выглядит следующим образом.

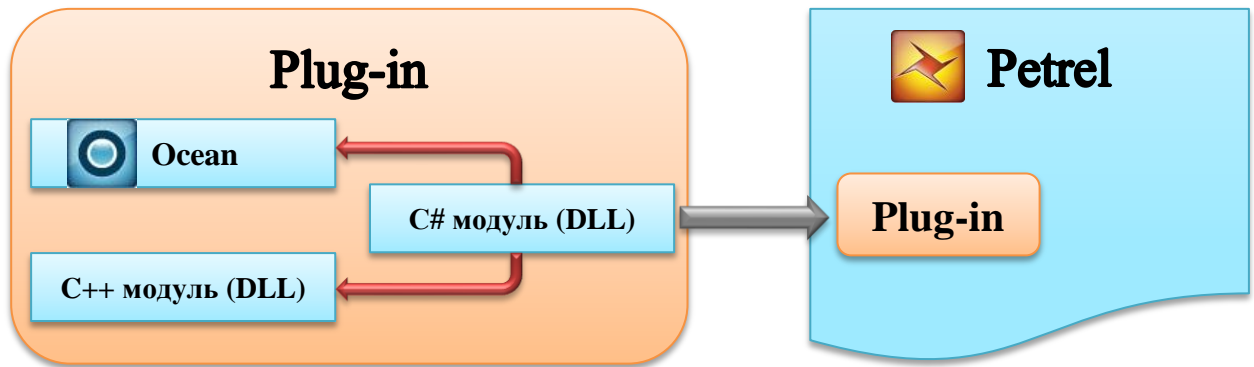


Рис. 8. Структура программного модуля для платформы Petrel.

2.2 Методы и их взаимодействие в программном модуле

Программный модуль предоставляет пользователям платформы Petrel необходимый набор методов для построения корреляционного решения для заданного набора скважин.

В их число входят:

- Алгоритмы генерации парных сочетаний скважин;
- Алгоритмы генерации планшетов мер различия;
- Алгоритмы расстановки границ;
- Алгоритмы построения корреляционного решения.

Методы имеют тесную связь и используют выходные данные друг у друга. В связи с этим имеется строгая очередность их выполнения в программном модуле.

После создания проекта в среде Petrel и загрузки всех необходимых данных для построения корреляционной модели программный модуль можно использовать для решения задачи.

В первую очередь пользователь должен сгенерировать пары скважин, используя один из методов, описанных в разделе 3.3.1, поскольку без наличия связей между скважинами невозможно будет приступить ко второй части работы. Входными данными для алгоритмов этого метода служат координаты скважин. Следующим шагом является построение двумерных планшетов меры различия между парами скважин, отражающих схожесть различных участков стволов скважин, раздел 3.3.2. По сути, этот шаг является основополагающим в дальнейшей работе всего метода и требует тщательной настройки параметров алгоритма генерации планшетов. Входными данными для метода служат

парные сочетания скважин, данные каротажных измерений, а также известные стратиграфические горизонты. Следующий шаг это выделение границ пластов, одним из алгоритмов, описанных в разделе 3.3.3. Именно результат этого шага в дальнейшем будет использоваться в алгоритмах построения корреляционной модели, и выделенные на этом шаге границы пластов будут прослеживаться между всеми исследуемыми скважинами. Входными данными для алгоритма служат данные каротажных измерений, выбранные пользователем. И наконец, последним этапом работы с программным модулем являются алгоритмы построения корреляционной модели, выходные данные которых представляют итоговый результат, раздел 3.3.4 и 3.3.5. Выполнение этого шага может осуществляться либо в автоматическом режиме, либо в итеративном режиме с возможностью изменения результатов в процессе работы метода. При выполнении они используют все ранее рассчитанные результаты: двумерные планшеты Жековского, выделенные границы пластов, а также сгенерированную сетку парных сочетаний скважин.



Рис. 9. Схема взаимодействия методов

2.3 Реализация алгоритмов для решения задачи корреляции разрезов скважин

2.3.1 Генерация парных сочетаний скважин

Для того чтобы определить пары скважин и имеющиеся в каждой паре общие методы ГИС, для которых будут рассчитаны планшеты меры различия, применяются методы построения сеток, где скважины рассматриваются в качестве её узлов. Для решения этой задачи в программном модуле реализованы следующие методы: алгоритм построения триангуляционной сети, построение парных сочетаний скважин на основе выбора опорной скважины, а также построение ломанной, соединяющей скважины в порядке их упоминания в рассматриваемом проекте Petrel. В качестве входных данных алгоритм использует координаты скважин.

В алгоритме построения триангуляционной сети каждый узел представляет собой скважину, координаты которого выбраны среди известных точек на траектории скважины. Это могут быть координаты устья или забоя скважин, либо известные координаты пересечения скважин с одним и тем же пластом. После чего, используя полученные значения, начинает работать алгоритм построения триангуляционной сети. В данной реализации алгоритм использует “жадный” подход и присоединяет каждый следующий треугольник к текущему решению, исходя из значения его периметра. Выбирается треугольник с наименьшим значением. Затем недостающие ребра сети, если такие существуют, добавляются к полученному решению (рис. 10).

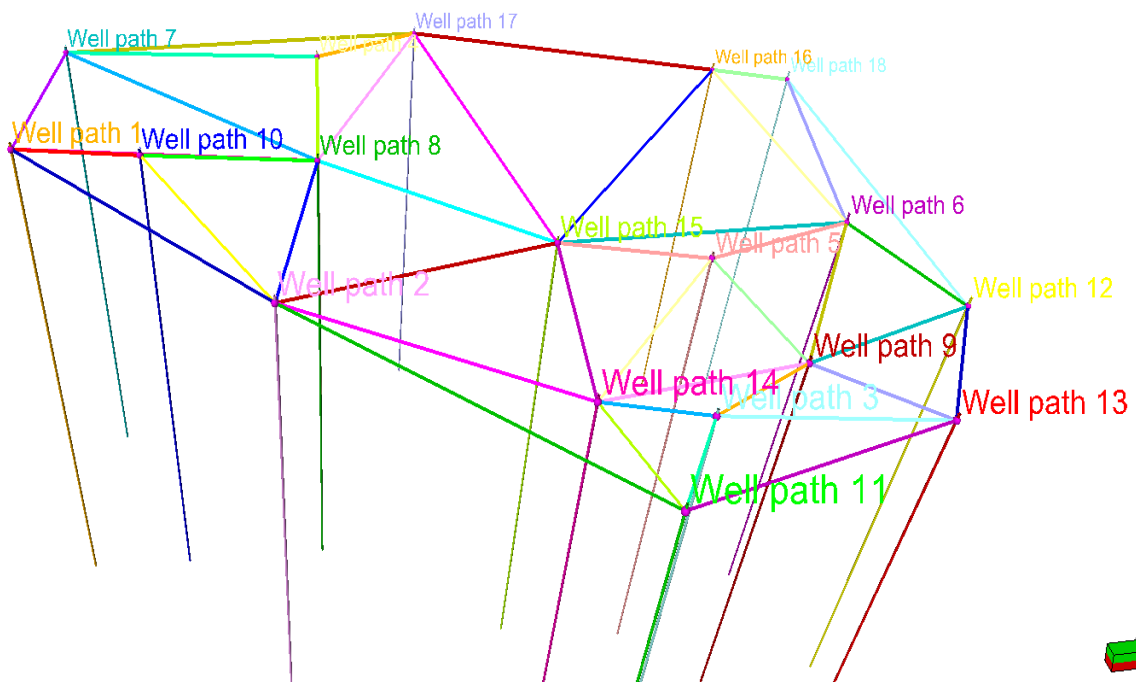


Рис. 10. Триангуляционная сеть для системы скважин.

Второй способ построения парных сочетаний использует выбранную опорную скважину и строит сеть таким образом, что опорная скважина имеет соединения с каждой скважиной в проекте (рис. 11).

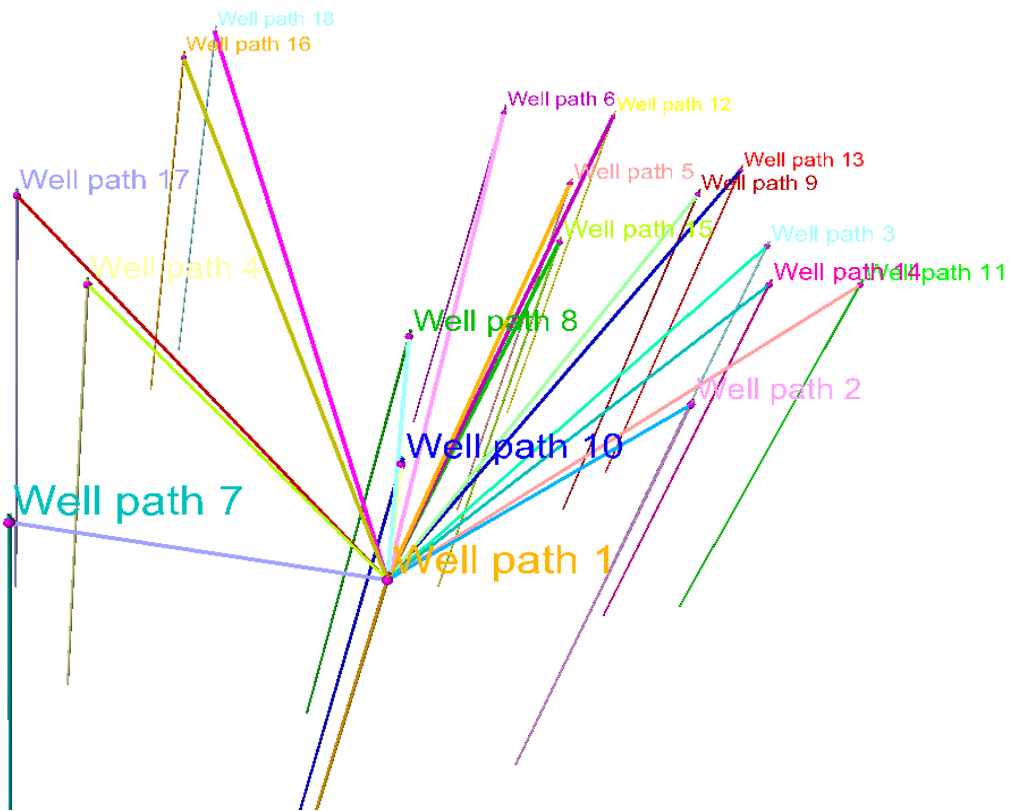


Рис. 11. Парные сочетания с опорной скважиной.

После построения парных сочетаний алгоритм во всех трех случаях проверяет наличие общих методов ГИС в каждой паре. Проверка осуществляется только для тех методов, которые были выбраны пользователем для исследования. Если обнаруживается пара, в которой не существует ни одного общего метода ГИС, что означает невозможность создания планшета меры различия между скважинами, то следует указание выбрать другой набор методов ГИС для исследования. Кроме того, число общих методов ГИС в паре может оказаться больше одного, и каждая пара может иметь свой уникальный набор общих методов для расчета планшета.

Выбор алгоритма для генерации парных сочетаний скважин зависит от целей преследуемых пользователем. Так триангуляционная сетка позволяет исключить возникновение невязок в работе алгоритма построения корреляционного решения при добавлении следующей скважины к промежуточному решению. В результате чего решение не зависит от очередности добавления скважин. Однако в данном случае ошибка будет накапливаться в расчете многомерной карты меры различия. Построение парных сочетаний с опорной скважиной позволяет строить корреляционное решение каждой

скважины с выбранной “эталонной” скважиной. В этом варианте ошибка карты меры различия будем минимальной, но возможно возникновение несогласованности полученных стратиграфических горизонтов. И третий вариант генерации парных сочетаний в порядке их упоминания, позволяет строить корреляционное решение для группы скважин, организованных в виде разреза, где каждая скважина, кроме первой и последней в списке, имеет по одному у соседу слева и справа. Этот способ также может привести к несогласованной корреляционной модели, но влияние неточностей планшетов меры различия будет минимальным.

2.3.2 Построение планшета Жековского

2.3.2.1 Построение планшета Жековского для пары скважин

Данный метод выполняет расчет двумерной функции меры различия между парами скважин, показывающей насколько два фрагмента скважине не похожи друг на друга. Входными данными метода являются известные стратиграфические уровни, данные каротажных диаграмм, а также сгенерированная сеть парных сочетаний скважин. Сеть парных сочетаний говорит о том, для каких пар скважин и по каким каротажным данным должна быть рассчитана двумерная функция меры различия. Данные каротажа предоставляют информацию для оценки сходства\различия сравниваемых фрагментов скважин, а стратиграфические уровни определяют какие фрагменты скважин, заведомо имеют разную природу и относятся к разным пластам.

Для вычисления двумерных функции используется один из двух подходов: первый подход определяет средне взвешенное расстояние между каротажными кривыми. Пусть x_1 – значения глубины центральной точки фрагмента в первой из сравниваемых скважин, а x_2 соответственно во второй, A – длина сравниваемого фрагмента, s – переменная, по которой происходит интегрирование с диапазоном значений от $-A/2$, до $A/2$, g – каротажная кривая, заданная в обеих скважинах и для которой вычисляется расстояние между фрагментами скважин, $w(s)$ - весовая функция [21, 22].

$$f(x_1, x_2) = \sqrt{\frac{\int_{-\frac{A}{2}}^{\frac{A}{2}} [w(s) * (g(x_1 + s) - g(x_2 + s))]^2 ds}{\int_{-\frac{A}{2}}^{\frac{A}{2}} (w(s)) ds}} \quad (1)$$

В качестве весовой функции используется функция Гаусса с задаваемым внешним параметром σ . Она определяет степень влияния удаленных точек в сравниваемых фрагментах от точек x_1 и x_2 соответственно.

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

Другой вид функции расстояния определяется через взвешенные скользящие коэффициенты корреляции [21, 22].

$$f(x_1, x_2) = \frac{1 - r(g(x_1), g(x_2))}{2} \quad (3)$$

Здесь $r(g(x_1), g(x_2))$ - вычисленный в интервале от $-A/2$ до $A/2$ коэффициент корреляции между каротажными кривыми $g(x_1)$ и $g(x_2)$.

$$r(g(x_1), g(x_2)) = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 \sum (Y - \bar{Y})^2}} \quad (4)$$

После вычисления значения в каждой точке планшета, он нормируется в диапазоне от 0 до 1.

Выбор подхода зависит от типа и форматов данных каротажных кривых. Так если каротажные кривые в обеих скважинах нормированы в одном и том же диапазоне, то можно использовать как первый, так и второй подход расчета двумерной функции. Второй подход является более универсальным и оценивает схожесть поведения каротажных кривых вне зависимости от пределов колебания их значений.

Кроме того для построения планшета Жековского, могут быть использованы несколько каротажных кривых. В этом случае для пары скважин строятся планшеты по каждому типу каротажной кривой. После чего возможны два варианта совмещения их в один планшет. Первый вариант предусматривает наличие весовых коэффициентов для каждого типа каротажа, значение которых может варьироваться от 0 до 1. Учитывая значение весового коэффициента для конкретного планшета, итоговая двумерная функция различия получается в результате суммирования рассчитанных планшетов. Вторым вариантом получает итоговую карту в результате сравнения значений из рассчитанных планшетов и выбора минимального среди них.

Использование нескольких функций расстояний между скважинами может оказаться полезным, в тех случаях, когда разные каротажные кривые эффективно расчленяют различные части разреза.

Также алгоритм предусматривает задание шага дискретизации планшета по осям, для этого используется линейная аппроксимация результатов измерения ГИС методов.

2.3.2.2 Построение планшета Жековского для группы из $n > 2$ скважин

Как отмечалось в разделе 1.5.1 подход в использовании планшета Жековского для определения различия между разными участками стволов скважин применим также для групп скважин. В этом случае строится многомерный планшет (размерность n) для набора

скважин, отражающий меру различия между всеми скважинами. Соответственно каждой точке планшета сопоставлен вектор глубин размерности n [21, 22].

Для построения многомерной карты реализовано два подхода к её вычислению:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sqrt{\sum f(x_i, x_j)^2 * w_{ij}^2}; \quad (5)$$

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \exp \left[\frac{\sum \lg(f(x_i, x_j)) * w_{ij}}{\sum w_{ij}} \right]. \quad (6)$$

Где $f(x_i, x_j)$ – двумерная функция различия между скважинами i и j , а w_{ij} – весовой коэффициент этой функции равный 0 либо 1 в соответствии с тем, нужно ли учитывать эту функции или нет.

Именно использование многомерных планшетов Жековского для групп скважин позволяет находить корреляционные решения в данной реализации.

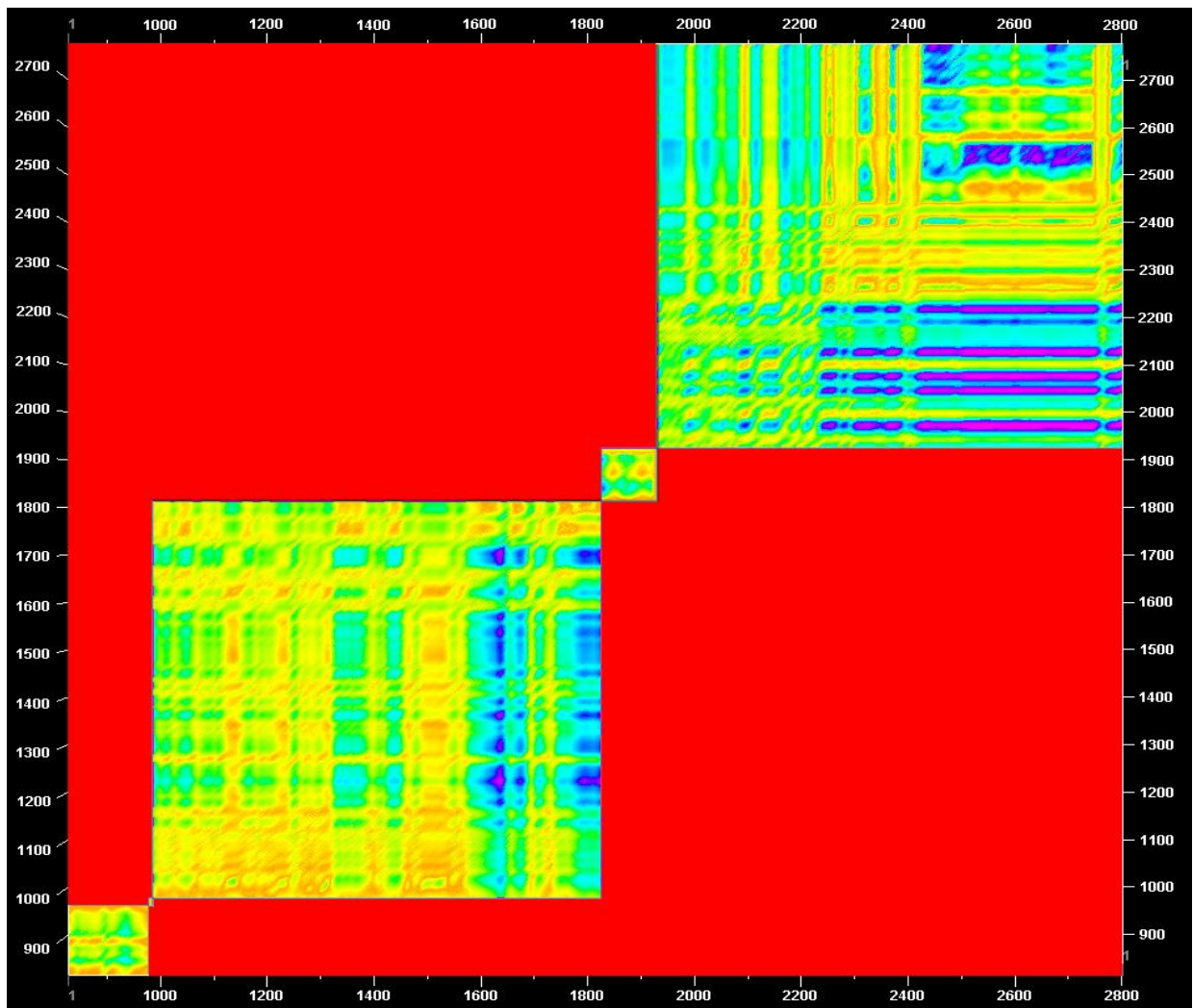


Рис. 12. Планшет Жековского на интервале с тремя известными статиграфическими границами в системе Petrel.

2.3.3 Расстановка границ для корреляции

Данные методы выделяют границы пластов породы по данным каротажных диаграмм с целью дальнейшей их идентификации во всех исследуемых скважинах. В настоящем программном модуле представлены 5 способов выделения границ.

2.3.3.1 Ручная расстановка границ или использование корреляционной модели

Этот режим позволяет средствами программной среды Petrel выделить на каротажных диаграммах совокупность границ для корреляции в ручном режиме, либо использовать незавершенную корреляционную модель с целью её доопределения. Под незавершенной корреляционной моделью в данном случае подразумевается, что границы, которые не были прослежены во всех исследуемых скважинах, в дальнейшем будут рассматриваться как входные данные для алгоритма построения корреляционной модели.

2.3.3.2 Расстановка границ с заданным интервалом

Данный метод автоматически выделяет границы в одной из скважин во всем интервале исследования через каждые n-метров заданные пользователем. Выбор скважины, в которой производится расстановка, зависит от способа построения сети пар скважин. Для парного сопоставления с использованием опорной скважины границы расставляются в опорной скважине, во всех остальных случаях выбирается первая в списке скважина. Использование этого метода позволит в конечном итоге увидеть общую структуру корреляционной модели. Этот и все последующие варианты расстановки границ рассматриваются уже для построения корреляционной модели с нуля. Пример расстановки границ по данному методу представлен на рис. 13.

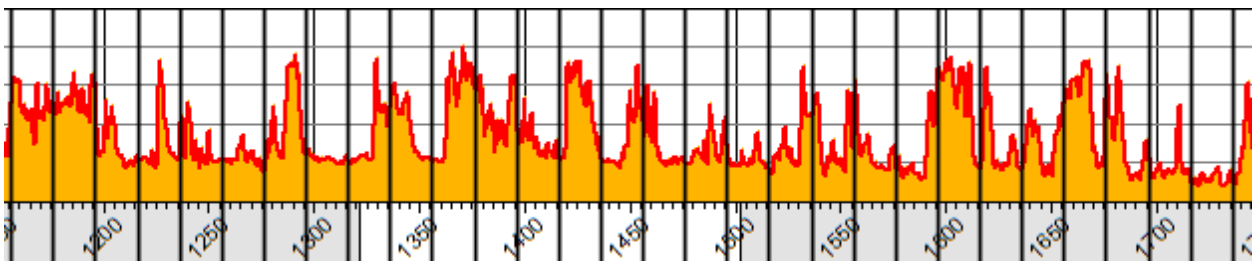


Рис. 13. Расстановка границ с заданным интервалом.

2.3.3.3 Расстановка границ градиентным методом

Расстановка границ градиентным методом в автоматическом режиме выделяет границы в той области каротажной кривой, которая характеризуется наибольшей скоростью роста измеренного параметра [5, 6].

Механизм работы данного алгоритма следующий: по набору точек входной кривой, представляющих результат измерения, строится её производная функция по приближенным формулам. Далее эта кривая рассматривается как весовая характеристика,

максимумы которой подозреваются на наличие границы пласта. Значения этой кривой в дальнейшем будут применяться для фильтрации расставленных границ.

Для определения первой производной применялась следующая приближенная формула:

$$f'(x) \approx \frac{-f(x+2h) + 8f(x+h) - 8f(x-h) + f(x-2h)}{12h}. \quad (7)$$

Нахождение границ пластов по рассчитанной весовой функции осуществляется с помощью расчета её производной функции и обнаружения на ней интервалов, меняющих знак с положительного значения на отрицательное. После чего на данном интервале берется точка, значение которой наиболее близко к нулевому, что соответствует максимуму весовой функции.

Фильтрация границ проводится посредством указания критерия значения и минимального расстояния между двумя соседними границами (мощность пласта). На начальном этапе среди всех предоставленных границ фильтруются те из них, коэффициент значимости которых меньше указанного значения, далее среди оставшихся границ проверяется минимальное расстояние между ними, если оно оказывается меньше заданного параметра, удаляется та граница из двух, которая обладает более низким критерием значимости. После чего алгоритм выдает конечный результат.

2.3.3.4 Расстановка границ на основе вычисления дисперсии

Данная расстановка границ также в автоматическом режиме выделяет границы в разрезе скважины. В его основе лежит вычисление дисперсий в окрестности каждой точки исследуемого интервала [5, 6] (рис. 14).

Механизм работы данного алгоритма схож с градиентным методом расстановки границ, за исключением подхода к вычислению функции весовой характеристики. Она строится следующим образом: для заданного пользователем размера окрестности строится массив, содержащий весовые значения точек окрестности. Чем дальше находится точка окрестности от оцениваемой точки, тем меньшие поправки она вносит в расчет дисперсии. Формула данных весовых значений следующая:

$$w[base + i] = w[base - i] = e^{-\frac{(i*step)^2}{2sigma^2}}, \quad (8)$$

где w – весовое значение точки окрестности, $base$ – оцениваемая точка, i – число шагов от оцениваемой точки, $step$ – шаг измерения каротажа, $sigma$ – параметр.

Далее вычисляется дисперсия на всей окрестности, а также на верхней и нижней полу окрестности по следующим формулам:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=0}^{count} f(i) * w(i)}{\sum_{i=0}^{count} w(i)}; \quad (9)$$

$$\sigma = \frac{\sum_{i=0}^{count} (f(i) - \bar{x})^2 * w(i)}{\sum_{i=0}^{count} w(i)}. \quad (10)$$

Где count – размер окрестности, на которой ведется расчет дисперсии, $f(i)$ – значение входных данных i -ой точки, $w(i)$ – весовое значения i -ой точки окрестности. После чего происходит расчет непосредственно функции весовой характеристики:

$$weight[i] = \sigma[i] - \frac{(\sigma1[i] + \sigma2[i])}{2}, \quad (11)$$

где σ – дисперсия всей окрестности оцениваемой точки, $\sigma1$ – дисперсия верхней полу окрестности, $\sigma2$ – дисперсия нижней полу окрестности.

Далее работа алгоритма полностью повторяет работу градиентного метода расстановки границ. Максимумы этой функции подозреваются на наличие границы пласта. По этому значению происходит дальнейшая фильтрация расставленных границ.

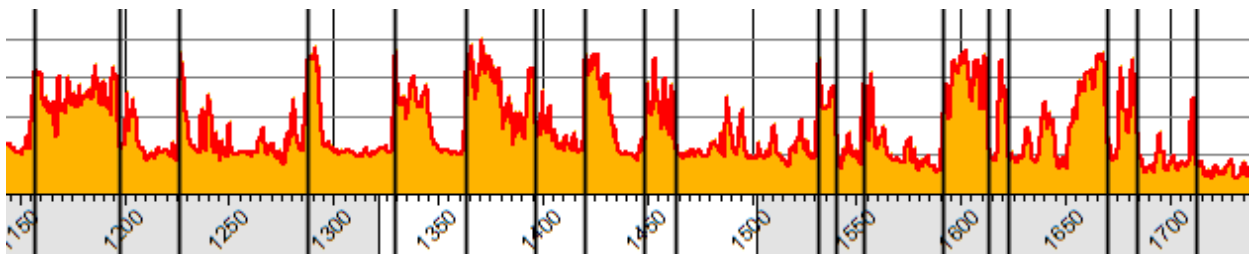


Рис. 14. Расстановка границ на основе вычисления дисперсии.

2.3.3.5 Равномерная расстановка границ

Данный вариант расстановки границ доступен только для метода построения корреляционного решения на основе волнового алгоритма Ли. Его суть заключается в том, что корреляционное решение представляет собой многомерную кривую, каждая точка которой соответствует некоторому стратиграфическому уровню во всех скважинах. Задав определенный шаг можно равномерно выделить на этой кривой точки, которые будут представлять собой итоговый результат корреляции.

2.3.4 Построение корреляционного решения на основе проективной модели

Данный метод построения корреляционного решения использует в своей основе построение проективной модели Хейтса, которая служит начальным приближением, и в ходе работы алгоритм уточняет расположение каждой границы посредством многомерных планшетов Жековского [1, 13, 21, 22]. Входными данными для метода служат сгенерированная сеть парных сочетаний скважин, рассчитанные двумерные функции меры различия для пар скважин, известные стратиграфические уровни, а также выделенные границы пластов для прослеживания.

Принцип работы метода заключается в следующем: среди выделенных границ пластов выбирается заданное пользователем число границ имеющих наибольшие весовые коэффициенты и для каждой из них строится корреляционное решение. Полученные решения могут пересекаться, что недопустимо, и в результирующую модель выбирается только одно лучшее решение. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не будут прослежены все выделенные границы. Причем, результат каждой следующей прослеженной границы учитывает результат предыдущей, поскольку решения в итоговой модели не могут пересекаться. Трассировка каждой корреляционной границы осуществляется следующим образом: изначально граница задана только на одной скважине, для неё строится образ согласно проективной модели в смежной скважине. Выбор скважины осуществляется исходя из построенной сети парных сочетаний. При этом если исследуемая граница ограничена сверху или снизу или и сверху и снизу, уже

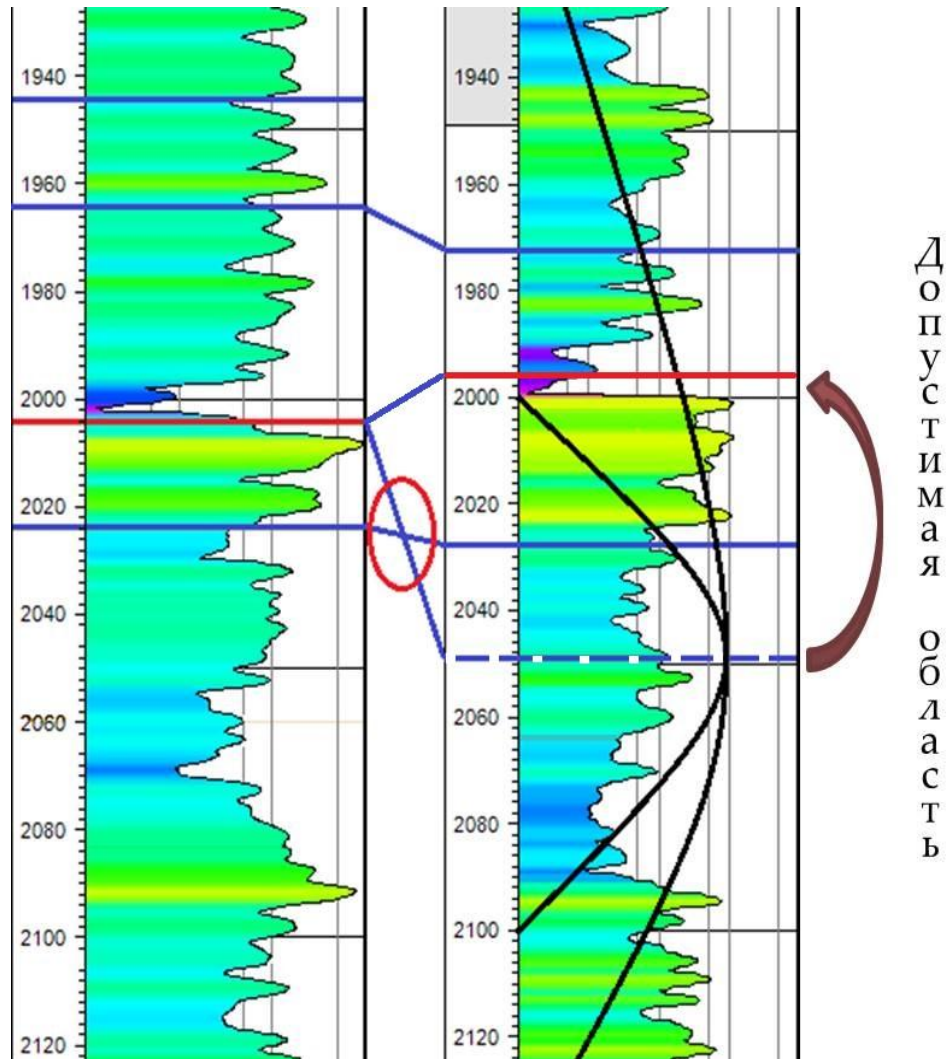


Рис. 15. Построение решения на основе проективной модели.

прослеженными границами, то она может изменяться в соседней скважине только в интервале этих же прослеженных границ. После чего, принимая во внимание внешний параметр алгоритма – линейность модели, рассчитанные планшеты мер различий и прослеженные границы, происходит уточнение расположения этой границы в смежной скважине (рис. 15). Уточнение расположения заключается в привязке границы к локальному минимуму следующей функции:

$$\min_{x_n \in A} (1 - (1 - f(x_1, x_2, \dots, x_n)) * w(x_n)), \quad (12)$$

где $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – многомерная функция меры различия, A – интервал в котором происходит уточнение расположения границы, $w(x_n)$ – функция линейности.

В качестве функции линейности используется функция Гаусса с задаваемым внешним параметром линейности σ .

$$w(x_n) = e^{\frac{-(x_n - x)^2}{2\sigma^2}}, \quad (13)$$

где x – глубина образа границы согласно проективной модели. В зависимости от параметра σ получаемые решения могут иметь различный характер. При минимальном значении параметра, результат соответствует ситуации, когда в качестве решения используется проективная модель корреляции Хейтса. При максимально возможном значении результат полностью зависит только от многомерной функции меры различия между фрагментами разрезов скважин. По значению функции также происходит выбор лучшего решения среди конкурентов.

Таким образом, граница последовательно отображается и уточняется во всех скважинах. В конечном итоге мы получим согласованную корреляционную модель.

Принимая во внимание тот факт, что каждая следующая прослеженная граница зависит от качества построения предыдущей, в программном модуле предусмотрен режим, в котором пользователь может пошагово добавлять каждую следующую границу и в случае неудовлетворительного результата вручную корректировать её расположение средствами среды Petrel. Тем самым интерпретатор проводит качественную оценку получаемых решений, а также оказывает влияние на результат прослеживания следующей границы, и как следствие, на результат итоговой корреляционной модели.

2.3.5 Построение корреляционного решения на основе волнового алгоритма Ли

Построение корреляционной модели на основе волнового алгоритма Ли использует в основе нахождения оптимальной линии на многомерном планшете меры различия. Для построения многомерных планшетов нами применяются одна из функций, описанных в части 2.3.2.2 [2, 21, 22].

Принцип работы этого метода заключается в следующем: на первом этапе выбирается ребро в построенной сети парных сочетаний скважин, далее для этого ребра, соответствующего паре скважин, мы с помощью алгоритма поиска пути в двумерном лабиринте или другими словами волнового алгоритма находим оптимальную корреляционную линию на построенном двумерном планшете (рис. 16). Реализация и идея применения алгоритма поиска пути в двумерном лабиринте к решению задачи корреляции принадлежит Власову А. А.. Поиск оптимальной корреляционной линии проводится из соображений минимизации следующей функции:

$$\int_L f(x_1, x_2) dL \rightarrow \min, \quad (14)$$

где L – искомая линия на планшете, $f(x_1, x_2)$ – двумерная функция меры различия.

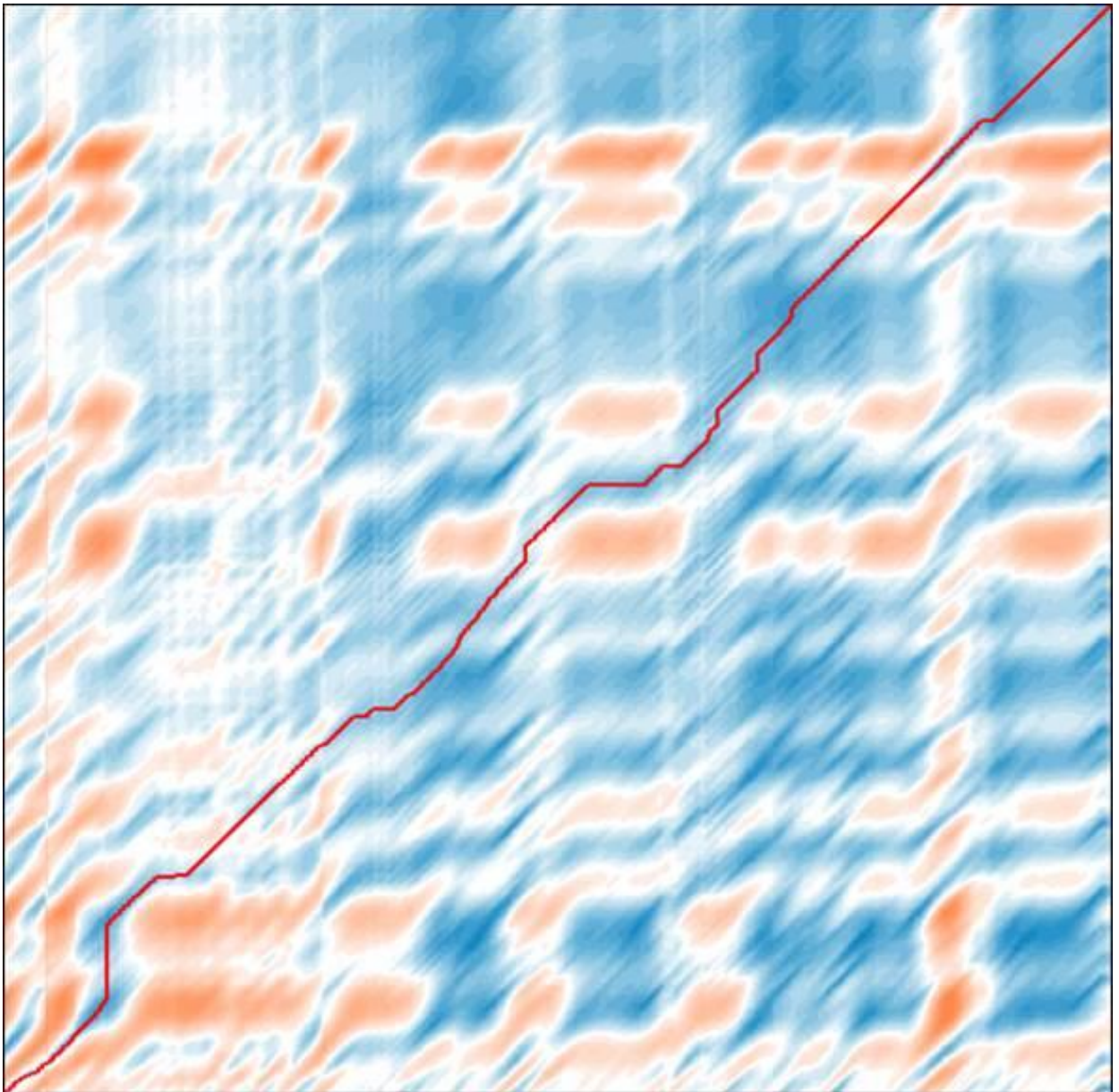


Рис. 16. Корреляционная линия на планшете Жековского

В реализацию волнового алгоритма был добавлен параметр штрафа при шаге по диагонали, с целью исключить только диагональные решения, поскольку они имеют меньшую длину. Также была добавлена возможность поиска решения не только из крайних точек планшета Жековского, а также до какой-либо границы планшета, а также возможность задать точки, через которые должна пройти волна, об этом будет рассказано дальше.

Далее к построенному решению добавляется следующая скважина смежная предыдущему решению и для них рассчитывается многомерный планшет Жековского. Для упрощения вычислений многомерный планшет, при наличии оптимальной корреляционной линии между предыдущими скважинами, строится для вновь добавленной скважины и построенной корреляционной линией, используя рассчитанные ранее двумерные планшеты меры различия. После чего для вновь построенного планшета вновь запускается волновой алгоритм, который находит корреляционное решение уже для трех скважин.

$$\int_L f(x_1, x_2, \dots, x_n) dL \rightarrow \min \quad (15)$$

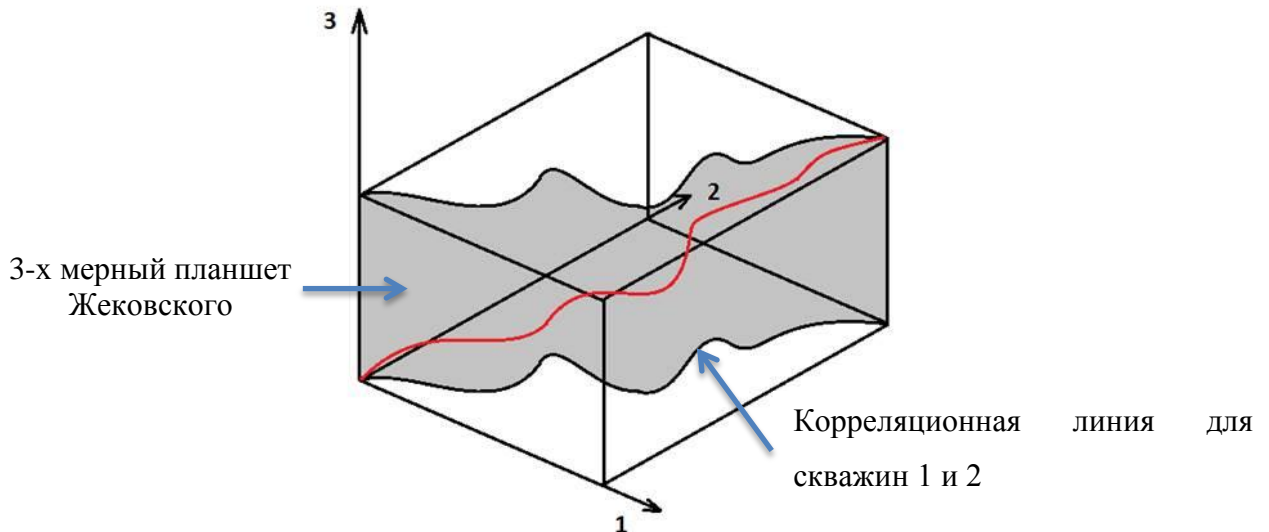


Рис. 17. Принцип построения многомерного планшета Жековского для трех скважин.

И так далее метод продолжает работу пока в решение не будут добавлены все скважины. В результате мы будем иметь многомерную корреляционную линию, каждая точка которой представляет собой вектор соответствующий некоторому стратиграфическому уровню во всех скважинах. После чего метод находит расставленные ранее границы на полученной корреляционной линии, и мы получаем искомый результат.

Порядок выбора следующей скважины также является одной из задач, разрешаемой в ходе выполнения метода, поскольку от её выбора зависит итоговый результат корреляции. Решается эта задача следующим образом. В случае если для генерации парных сочетаний был выбран метод с опорной скважиной, то начальной скважиной выбирается опорная скважина, а далее скважины присоединяются по принципу наиболее близких по расстоянию к опорной скважине. Если парные сочетания сгенерированы в порядке упоминания скважин в проекте Petrel, то стартовой скважиной выбирается первая в списке скважина, а дальше существует только единственный путь, чтобы пройти все скважины – в порядке их расположения в проекте Petrel. Третий вариант выбора скважины для парных сочетаний образующих триангуляционную сеть следующий: стартовой скважиной выбирается первая в списке скважина в проекте Petrel, далее выбирается ближайшая к ней по расстоянию скважина, после чего мы получаем первое ребро для которого выполняется поиск корреляционной линии по волновому алгоритму,

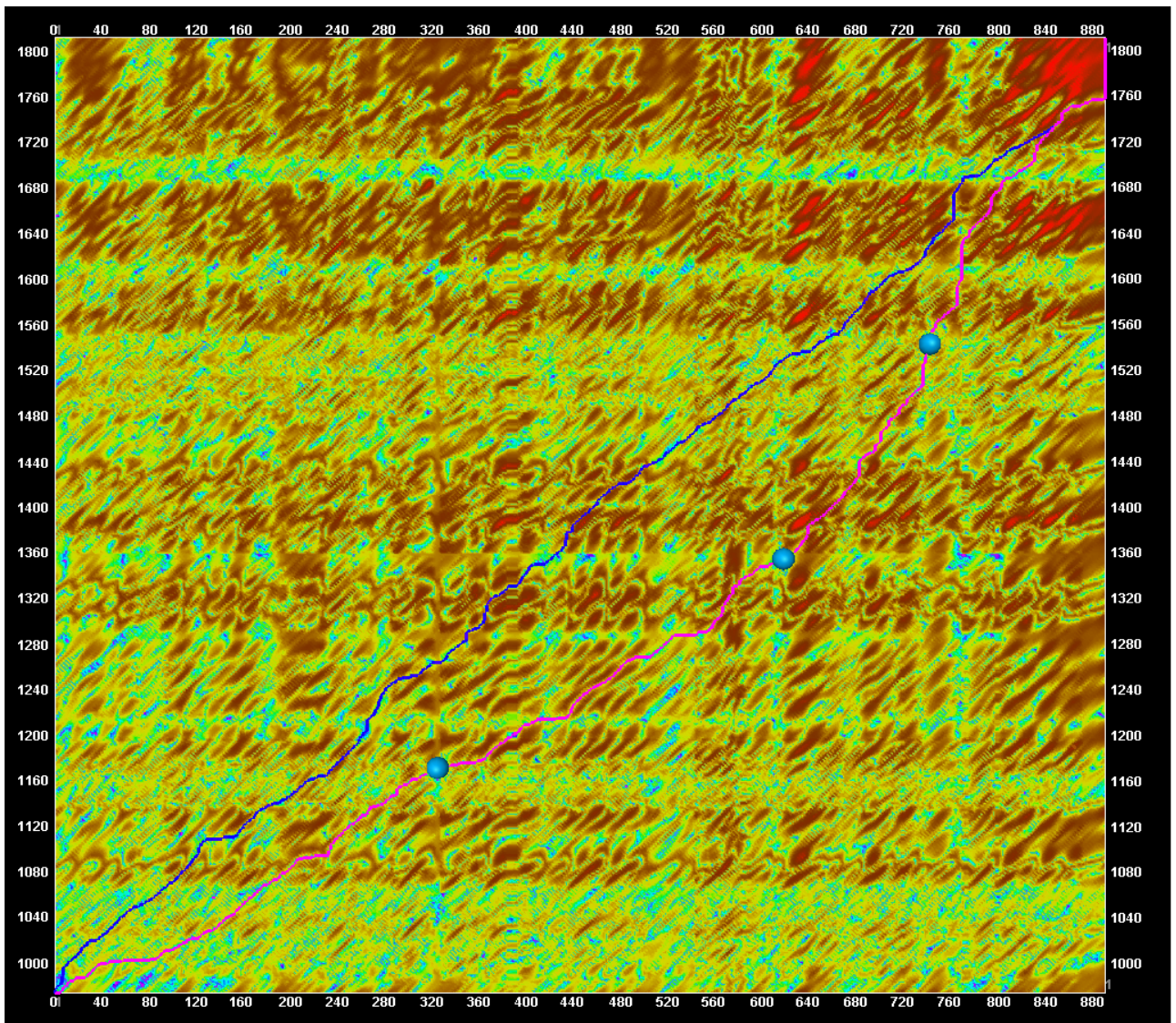


Рис. 18. Интерактивный режим работы с волновым методом.

дальше скважины добавляются по принципу наименьшего периметра треугольника образующегося при добавлении следующей скважины.

Кроме того, этот метод также предусматривает ручной режим работы, в котором пользователь на каждом этапе добавления новой скважины к решению может увидеть промежуточный результат и внести в него изменения на данном шаге, задав на текущем планшете точки через которые должна пройти корреляционная линия и затем пересчитать её. В результате интерпретатор может контролировать весь процесс построения корреляционной модели (рис. 18). Дополнительными параметрами метода также является возможность осреднения вертикальной и горизонтальной составляющей на вновь построенных многомерных планшетах, для сглаживания полученных карт и в дальнейшем предотвращения ситуаций, когда рассчитанные корреляционные линии имеют длительные горизонтальные или вертикальные участки, что соответствует склеиванию границ в корреляционной модели.

Глава 3. Применение и результаты работы программного модуля

3.1 Применение программного модуля

В представленной работе, построение корреляционного решения рассматривает только два самых простых случая залегания горных пород, описанных в разделе 1.5.2. Это согласное залегание горных пород и случаи с локальными перерывами в осадконакоплении (выклинивание слоев). Более сложные геологические структуры не будут опознаны в ходе работы программного модуля.

С точки зрения функционального применения программный модуль предусматривает два варианта использования. Это построение корреляционной модели с нуля, либо её доопределение, в случае если она содержит границы, которые не прослежены во всех исследуемых скважинах. Так же важным замечанием для применения модуля является то, что корреляция проводится только для преимущественно вертикальных скважин или для участков скважин, имеющих вертикальную траекторию.

Для построения корреляции программный модуль использует следующие входные данные:

- Данные о скважине
 - Координаты устья скважины;
 - Координаты забоя скважин;
 - Траектория скважины;
 - Данные о геофизических измерениях в скважине (каротаж)
- Данные об известных стратиграфических уровнях
 - Координаты пересечения скважины с пластом
- Интервал исследования

Интервал исследования также можно задавать, используя известные стратиграфические уровни.

Не смотря на то, что представленные методы работают в автоматическом режиме, это не исключает работу специалиста интерпретатора, который должен оценивать качество получаемых результатов и вносить в них какие-либо поправки в случае неудовлетворительных ответов.

Так в реализованном подходе построение корреляционной модели допускает использование любых типов каротажных данных. Однако за выбор, по каким именно данным ГИС измерений будет проводиться работа, отвечает интерпретатор, поскольку разные виды каротажа выделяют различные особенности пород. Кроме того, выбор

варианта корреляции, установка параметров алгоритмов и идентификация границ в разных скважинах также ответственность специалиста.

Работа программного модуля тестировалась на проекте, включающем 77 скважин. Для составления корреляционной модели месторождения скважины были разбиты на 3 участка по территориальным соображениям, и для каждой части была проведена корреляция скважин. Фрагмент полученных результатов представлен на рисунках 19 и 20. Здесь представлен результат работы двух методов модуля на одном и том же интервале для 6 скважин. Результаты не корректировались вручную и полностью представляют выходные данные алгоритмов. Для проведения корреляции было использовано построение триангуляционной сети и соответствующие ей планшеты Жековского для метода ПС (самопроизвольная поляризация), границы для прослеживания были выставлены вручную. Как видно из рисунков оба метода хорошо отработали представленные им структуры в разрезах скважин. Однако результат работы методов имеет различия, не противоречащие друг другу. Обе модели имеют право на существование, и в данной ситуации решение остается за интерпретатором.

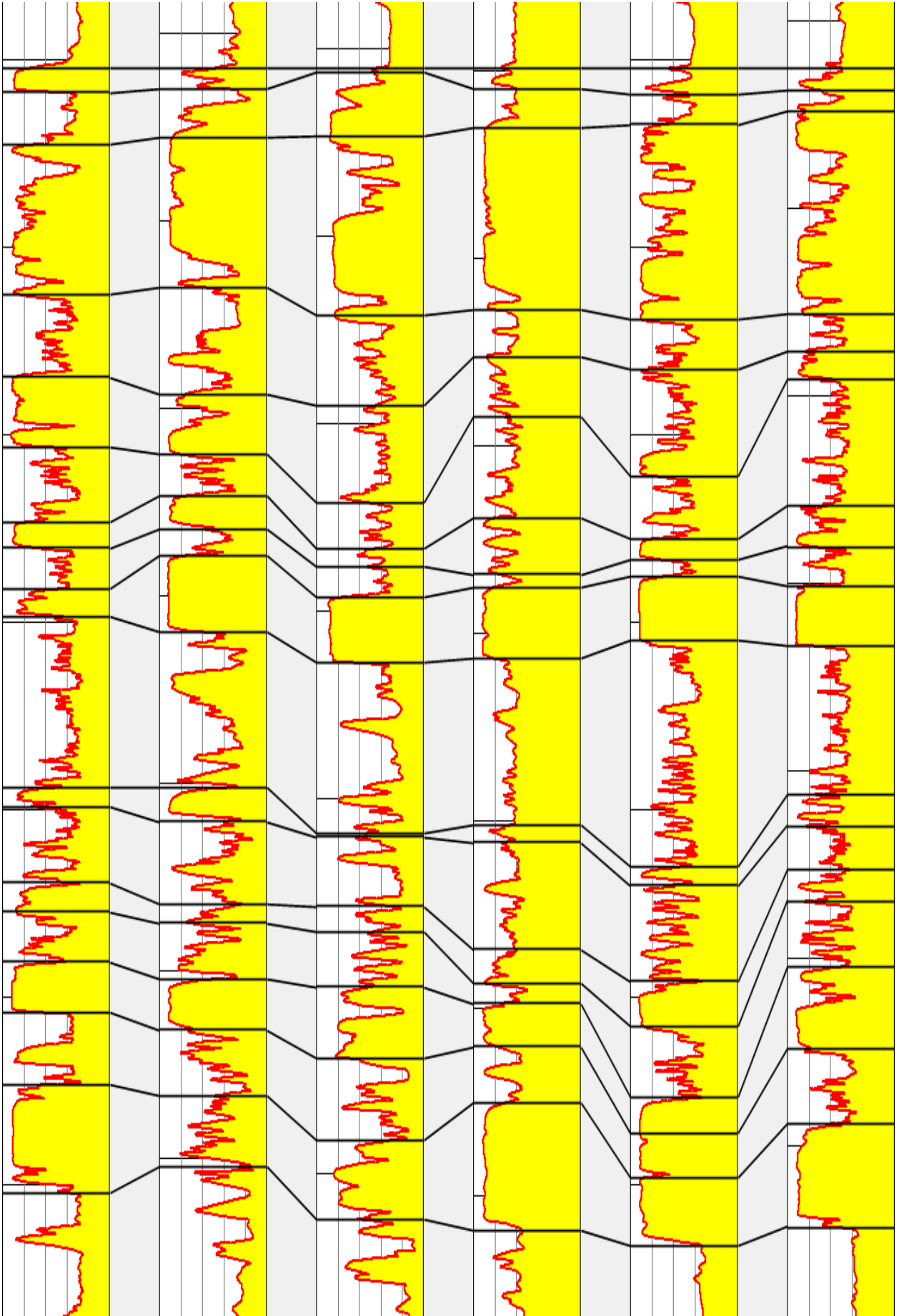


Рис. 19. Пример работы метода на основе волнового алгоритма на экспериментальных данных.

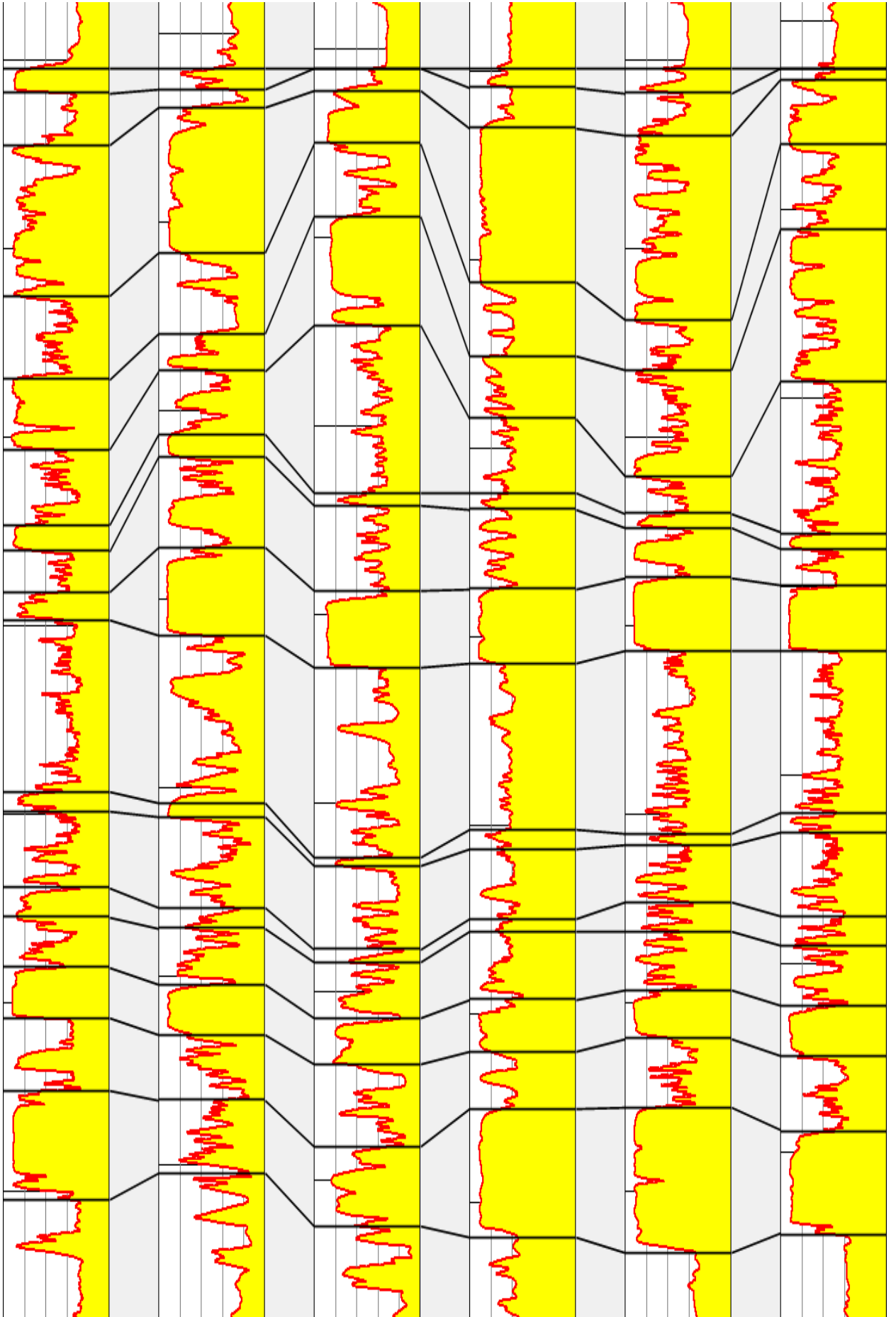


Рис. 20. Пример работы метода на основе проективной модели на экспериментальных данных.

3.3 Производительность

Как уже было отмечено, число скважин, для которых строится корреляционная модель, порой достигает нескольких сотен и в данной ситуации немаловажную роль играет производительность реализованных средств. Для проекта в 77 скважин время работы метода для генерации пар скважин и соответствующих планшетов составило порядка 140 секунд, при этом стоит отметить тот факт, что рассчитанные планшеты в процессе работы алгоритма сохраняются на жесткий диск, поскольку хранить данные в оперативной памяти при большем количестве скважин становится невозможно. Так для 77 скважин в триангуляционной сети составлено 212 пар, для каждой пары в нашем примере генерируется планшет с шагом дискретизации в 1 метр и в среднем размером 1000x1000 метров. В таком случае необходимо ~1.6 Гб оперативной памяти для того чтобы быстро работать с планшетами, что является неприемлемым. Для метода корреляции на основе волнового алгоритма время работы составило порядка 260 секунд. Второй метод корреляции на основе проективной модели применим только для случая с небольшим числом скважин, поскольку он требует загрузки в оперативную память всех построенных планшетов Жековского. Его время работы для 77 скважин составило порядка 180 секунд, при этом большая часть времени затрачена на загрузку планшетов в память. Замеры производились на процессоре Intel (R) XEON(R) CPU X5660: 2.80 GHz.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате настоящей работы было разработано программное расширение для платформы Petrel, предоставляющее пользователям этого продукта инструменты по созданию корреляционных моделей разрезов скважин в автоматическом режиме. Это позволит обрабатывать большие объемы скважинных данных и создавать для них корреляционные модели в более сжатые сроки. Таким образом, поставленная цель была выполнена, также было проведено тестирование представленных методов и проведена оценка качества получаемых результатов, по итогам которых можно считать реализованные алгоритмы успешными.

Представленные методы по межскважинной корреляции являются уникальными и практически не имеют аналогов в современных программных продуктах. С их помощью проводится изучение данных, полученных в результате геофизических исследований скважин, а также делаются выводы о пространственном расположении пластов на месторождении и оцениваются запасы и объемы нефтепродуктивных пластов.

В дальнейшем данный программный модуль может подлежать усовершенствованию текущих методов. Так, например, к реализованным моделям корреляции можно добавить более сложные структуры, описанные в разделе 2.2. Кроме того данный метод также можно интегрировать в другие программные средства для анализа и интерпретации геофизических данных, с этой целью вычислительный модуль, содержащий реализацию основных алгоритмов метода, был вынесен в отдельную программную библиотеку.

Основные материалы по данной работе были изложены в виде тезисов и доклада «Корреляция данных геофизических исследований для системы скважин» на 51-й Международной научной студенческой конференции [7], а также в виде статьи в рецензируемом издании Гео-Сибирь 2013 и докладе «Метод автоматической корреляции разрезов скважин по геофизическим данным в программном комплексе Petrel» на XI международной выставке и научном конгрессе «Гео-Сибирь 2013» [8]. Кроме того данной работе посвящена статья в журнале «Геология и геофизика», которая прошла стадию рецензирования и ближайшее время будет опубликована в издании. [22].

ЛИТЕРАТУРА

1. Heites B. Perspective correlation. - Bull. AAPG, 1963, N 4, p. 553-574.
2. Lee, C. Y. An Algorithm for Path Connections and Its Applications, 1961, IRE Transactions on Electronic Computers EC-10 (2) – pp. 346–365
3. Ocean Documentation, Schlumberger.
4. Petrel, руководство по использованию, Schlumberger.
5. Бердов В.А. Выделение пластов межскважинного пространства по данным каротажа в программном комплексе Petrel. / Бердов В.А., Власов А.А., Лапковский В.В. // Материалы 50-й Международной научной студенческой конференции «Студенты и научно-технический прогресс»: Информационные технологии. 13–19 апреля 2012 г., НГУ, Новосибирск, стр. 139.
6. 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, стр. 76-81.
7. Бердов В.А. Корреляция данных геофизических исследований для системы скважин. / Бердов В.А., Лапковский В.В. //Материалы 51-й Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс»: Информационные технологии. 12-18 апреля 2013 г., НГУ, Новосибирск. – Новосибирск, 2013
8. 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. Т.3. Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология: сборник материалов XI Международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2013», 22-24 апреля Новосибирск – 2013. стр. 179-185.
9. Геофизические исследования скважин: Учебное пособие для вузов. / Добрынин В.М., Вендельштейн Б.Ю., Резванов Р.А., Африкян А.Н.; под ред. д.г.-м.н. В.М. Добрынина, к.т.н. Н.Е.Лазуткиной – М.:ФГУП Издательство «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2004. – 400 с.

10. Геофизические методы исследований. Учебное пособие для геофизических специальностей вузов / В.К. Хмелевской, Ю.И. Горбачев, А.В. Калинин [и др.]; под ред. д.г.-м.н. Н.И. Селиверстова. – М.: Петропавловск-Камчатский, изд-во КГПУ, 2004. – 232 с.
11. Гришкевич В.Ф. Изложение задачи корреляции большого числа скважин в терминах теории расчлененных алгоритмов. // Методы математического моделирования при решении прикладных задач нефтяной геологии. Тр. ЗапСибНИГНИ; Вып. 192. – Тюмень, 1984. – с. 15-19.
12. Гришкевич В.Ф. Формальная постановка задачи детальной литолого-стратиграфической корреляции. НТС «Проблемы нефти и газа Тюмени», Тюмень, 1974, № 23, с. 82-84.
13. Губерман Ш.А. О корреляции разрезов скважин [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.mygeos.com/2010/09/14/ot-avtora>
14. Губерман Ш.А., Овчинникова М.И. О машинной корреляции пластов в разрезах скважин по геофизическим данным. - Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли, 1972, № 3, с. 87-94.
15. Гутман И.А., Староверов В.М. Описание программы автоматической корреляции месторождений "AutoCorr". М., 2000, 224 с.
16. Гутман И.С., Балабан И.Ю., Кузнецова Г.П., Староверов В.М. Моделирование залежей углеводородов. Корреляция разрезов скважин в автоматическом и полуавтоматическом режиме с помощью программы "AutoCorr". SPE, 2006, 9 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.autocorr.stargeo.ru/autocorr/Art2006_10.pdf
17. Гутман И.С., Балабан И.Ю., Постнова О.В., Саакян М.И. Программный комплекс АСДV для изучения осадконакопления в залежах углеводородов сложного геологического строения. Геофизика, № 4, 2010, с. 17-25
18. Жековский Б. Новый метод стратиграфической корреляции. Экспресс-информация «Нефтепромысловое дело», ВИНТИ, М., 1963, № 31, реферат №135., с. 22-27
19. Ковалевский Е.В., Гогоненков Г.Н., Перепечкин М.В. Автоматическая корреляция скважин на основе формализации неопределённости [электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.cge.ru/?page=dvgeocorr_r#met4
20. Ковалевский Е.В., Гогоненков Г.Н., Перепечкин М.В. Уточнение геологических моделей посредством использования автоматической корреляции скважин. Недропользование XXI век, 2007, №4, стр. 28-31.

21. Лапковский В.В. Корреляция пластов по данным ГИС с многомерной оптимизацией. / Лапковский В.В., Истомин А.А. // Геомодель 2013 [электронный ресурс]. Режим доступа: http://old.ipgg.nsc.ru/Institute/Departments/BranchesAndAffiliates/GasAndOilGeology/1ab346/Shared%20Documents/LAPKOVSKY_Geomodel_2013-1.pdf
22. Лапковский В.В. Корреляция разрезов скважин как многомерная оптимизационная задача. / Лапковский В.В., Истомин А.В., Конторович В.А., Бердов В.А. Журнал "Геология и геофизика"
23. Хмелевской В.К. Геофизические методы исследования земной коры. Кн. 1: Методы прикладной и скважиной геофизики. Учебное пособие. / В.К. Хмелевской. – Дубна: Международный университет природы, общества и человека «Дубна», 1999. – 204 с.
24. Хмелевской В.К. Геофизические методы исследования земной коры. Кн. 2: Региональная, разведочная, инженерная и экологическая геофизика. Учебное пособие. / В.К. Хмелевской. – Дубна: Международный университет природы, общества и человека «Дубна», 1999. – 184 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(инструкция по работе с модулем)

Данное приложение описывает интерфейс и порядок работы с программным модулем в платформе Petrel.

1. Установка программного модуля:

Установка модуля осуществляется из среды Petrel посредством приложения Ocean Plug-in Manager. Его запуск осуществляется из меню Help (рис. А.1). После чего в открывшемся окне пользователь должен выполнить действие Install plug-in и выбрать путь к инсталлятору модуля. Инсталлятор представлен файлом с расширением .pip (Plug-in Installer Package) и имеет имя аналогичное названию программного модуля Well_Correlation. Выбрав данный файл, начнется установка программного модуля, по её завершении убедитесь, что модуль появился в списке, установленных плагинов и перезагрузите среду Petrel (рис. А.2). После перезагрузки программный модуль готов к использованию.

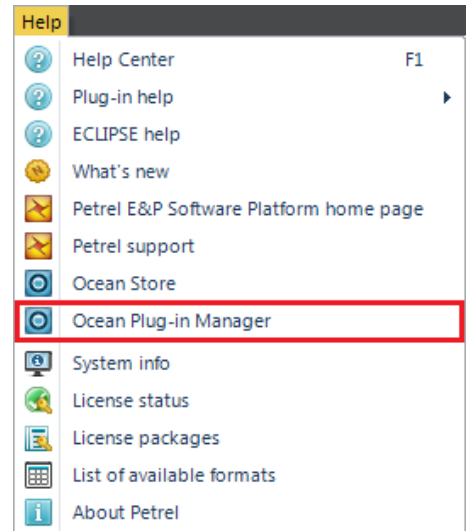


Рис. А.1. Меню Help.

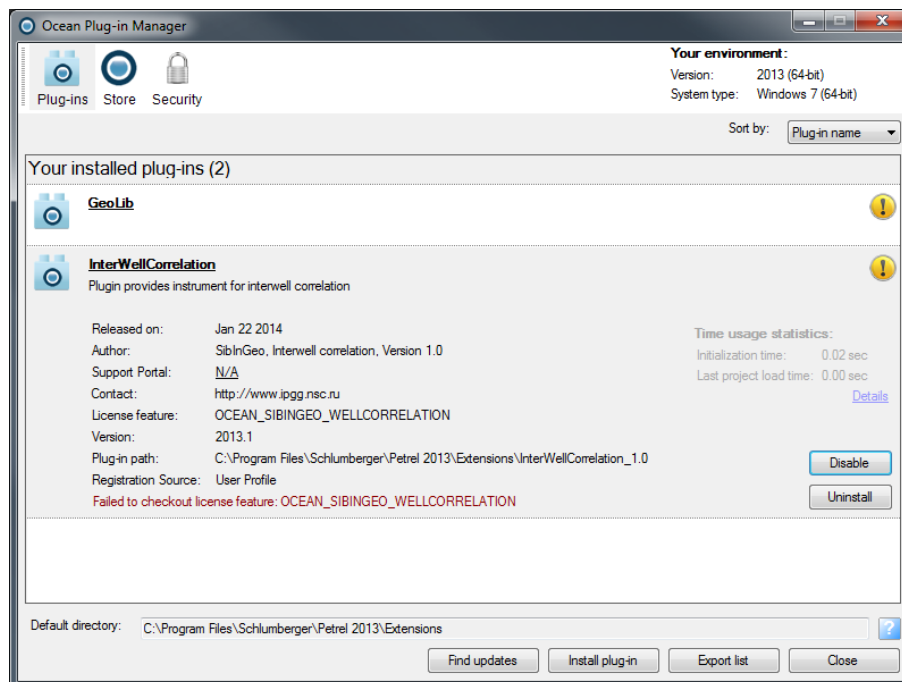



Рис. А.2. Ocean Plug-in Manager.

2. Порядок работы:f

После установки программный модуль помещается в окно процессов, откуда в дальнейшем его можно будет вызывать. Метод модуля имеет имя – Well Correlation и расположен во вкладке Plug-ins (рис. А.3). Выбрав метод, сделав по нему клик мышью, и нажав на иконку расположенную в области панели инструментов  либо с помощью двойного клика мышью по названию метода можно открыть диалоговое окно программного модуля. В данное окно мы загружаем исходные данные и здесь же производим настройку параметров алгоритмов, исполняющихся при работе метода.

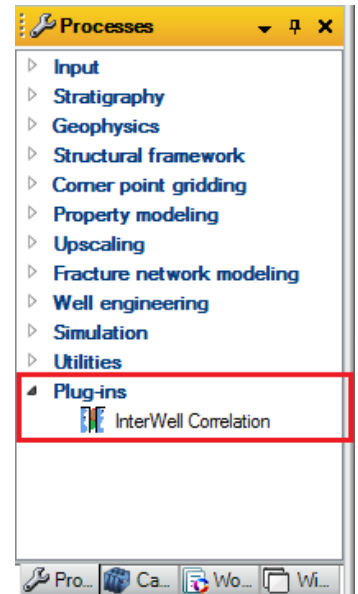






Рис. А.3. Окно процессов.

3. Input Tab:

Поле Well Folder предназначено для загрузки скважин. В это поле можно загрузить только данные представляющие собой папку, содержащую скважины в проекте Petrel. Загрузка осуществляется при нажатии кнопки  при этом загружается выделенный на данный момент набор данных. Выбора данных осуществляется одиночным кликом мыши по ним. После загрузки все скважины, хранящиеся в папке, будут представлены в списке расположенном в левой части диалогового окна. Из этого списка необходимо выбрать три и более скважины. Кроме того, вы можете выбрать все скважины, сделав отметку в поле select/unselect all boreholes.

Далее необходимо нажать на кнопку расположенную справа от данного списка скважин , после чего в таблице, расположенной в правой части диалогового окна, будут представлены методы каротажа, имеющиеся в выбранных нами скважинах. Из всего списка необходимо отметить только интересующие нас виды каротажа, а также указать с помощью полей Difference и Weight какие настройки будут применены для построения планшетов мер различия между скважинами. С помощью поля Difference задается метод, по которому строится планшет. Метод Distance определяется как средне взвешенное расстояние между каротажными графиками. Второй метод Correlation определяет расстояние через взвешенные скользящие коэффициенты корреляции. Поле Weight определяет, какой вклад вносит планшет, рассчитанный по данному каротажу, в итоговую карту. Значения варьируются в диапазоне от 0.1 до 1.0.

Также на данном этапе пользователь может загрузить данные существующих стратиграфических разбивок в поле Marker Folder с помощью кнопки  и удалить их при желании с помощью кнопки . При этом границы, которые прослежены во всех выбранных нами скважинах будут помещены в списки Top и Bottom. С помощью этих

полей мы можем задать исследуемый диапазон измерений. По умолчанию, устанавливаются диапазоны исследования для каждой скважины, соответствующие интервалам измерений. В поле Top устанавливается значение Start Depth соответствующее минимальной глубине, где есть данные по измерениям, в каждой скважине, а в поле Bottom устанавливается значение End Depth соответствующее максимальной глубине. Изменять интервал исследования также можно с помощью

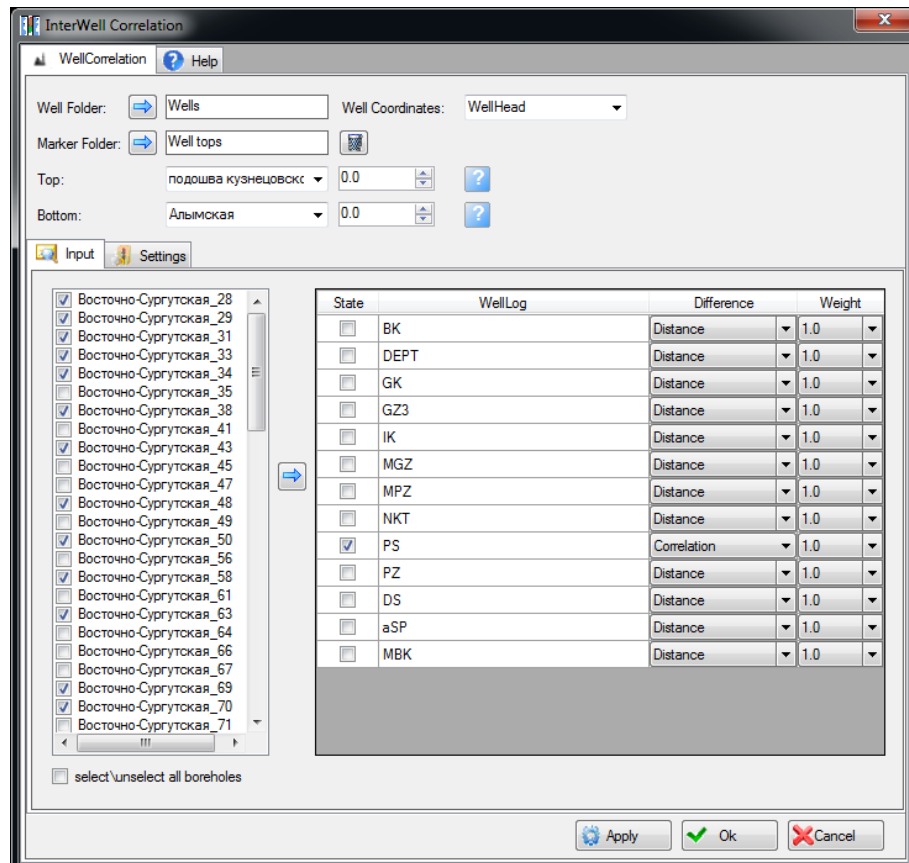


Рис. А.4. Вкладка Input.

счетчиков, расположенных справа от указанных полей. Значение в них суммируется с глубинами указанными в полях Top и Bottom. При этом нельзя задать глубину Top больше чем Bottom. (рис. А. 4)

После определения всех вышеперечисленных параметров можно перейти на вкладку Settings.

4. Settings Tab:

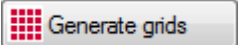
На данной вкладке (рис. А. 5) задаются параметры алгоритмов. Мы можем запустить их все сразу с текущими параметрами, нажав кнопку Apply или Ok (при нажатии кнопки Ok последует закрытие диалогового окна) либо запускать каждый алгоритм в отдельности и менять параметры для каждого из них. По завершению работы каждого из метода вы можете увидеть в окне Message Log информацию о завершении работы того или иного алгоритма. В работе метода используются четыре алгоритма: создание пар скважин,

построение планшетов мер различий между скважинами, расстановка границ в скважинах и алгоритм корреляции. Настройки для каждого из этих алгоритмов занимают определенное пространство в диалоговом окне на вкладке Settings. Результаты работы этих алгоритмов помещаются в папку, имя которой указано в поле Project Folder Name. Пользователь может указать конкретное имя либо оставить это поле пустым, в этом случае будет создана папка с именем Correlation folder по умолчанию.

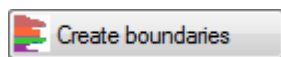
Область Grid settings содержит параметры алгоритма генерирования пар скважин и построения планшетов мер различия. Сгенерированные пары помещаются в папку с именем указанным в поле Name (первое поле сверху) и представляют собой линии между двумя скважинами. Поле Name можно оставить пустым, в этом случае по умолчанию будет создана папка с именем Pairs folder. Пары генерируются в соответствии с выбранными параметрами Neighbor, Triangle и Distance. Параметр Neighbor указывает, что будут созданы пары между скважинами в порядке их перечисления в списке, Triangle говорит о том, что для генерации пар будет запущен алгоритм триангуляции, где вершинами являются выбранные скважины, а параметр Distance указывает, что будут созданы пары между скважинами расстояние между которыми, меньше указанного значения. Пользователь может выбрать один или несколько параметров. В случае если было выбрано несколько алгоритмов генерации пар скважин, порядок их работы всегда следующий Triangle – Neighbor – Distance. Рекомендуется всегда использовать метод построения триангуляционной сети для создания корреляционной модели.

Далее пользователь может задать: нужно ли учитывать для построения планшетов меры различия между парами скважин каротажные данные, измерения по которым присутствуют не на всем исследуемом интервале. Переключатель – Use Full Interval Curves.

На следующем шаге пользователь должен задать параметры алгоритма построения планшетов мер различия. Полученные карты помещаются в папку с именем указанным в поле Name (второе сверху поле). В случае если поле Name пусто, используется имя по умолчанию Grid folder. Параметр Base Value указывает размер сравниваемых фрагментов каротажа для определения значения узла карты (параметр $A/2$ в формулах (1), (2)), измеряется в числе измерений. Параметр Sigma Value указывает, насколько сильно влияют значения расположенные дальше от центральной точки сравниваемого фрагмента каротажа (параметр σ в формуле (1)). Чем параметр больше, тем большее влияние оказывают удаленные участки. Параметр Step говорит о том, с каким интервалом будет

построен планшет меры различия между скважинами. Создание планшетов осуществляется при нажатии кнопки .

Область Boundary settings отвечает за расстановку границ. Результаты расстановки содержатся в папке стратиграфических отбивок с именем, указанным в поле Name, имя по умолчанию Boundaries folder. Для того чтобы иметь возможность выделить границы необходимо выбрать пункт Generate boundaries. После чего пользователю будет представлено три алгоритма расстановки границ на выбор: Variance method и Gradient method, а также Interval method. Первые два метода, по выбранным наборам каротажа, определяют границы пластов в исследуемом интервале, а третий метод генерирует границы через указанный пользователем интервал, идентификация границ проводится только для первой списке скважине. Variance method имеет четыре параметра для регулировки: Base Value – размер оцениваемого фрагмента каротажа, измеряется в количестве измерений, Sigma Value – степень влияния на результат оценки существования границы удаленных точек фрагмента от его центральной точки, Criterion – критерий отсева неявных границ и Min Layer – минимальное расстояние между двумя границами. Gradient method имеет параметры Min Layer и Criterion. Они имеют тот же смысл. Interval method имеет единственный параметр Min Layer. Полученные границы в дальнейшем будут прослеживаться между скважинами. Их создание осуществляется нажатием кнопки



. В случае если мы отметим Input boundaries, то для корреляции будут использоваться некоторые границы, которые были загружены в поле Marker Folder. Эти границы должны находиться в исследуемом диапазоне и не быть прослеженными во всех

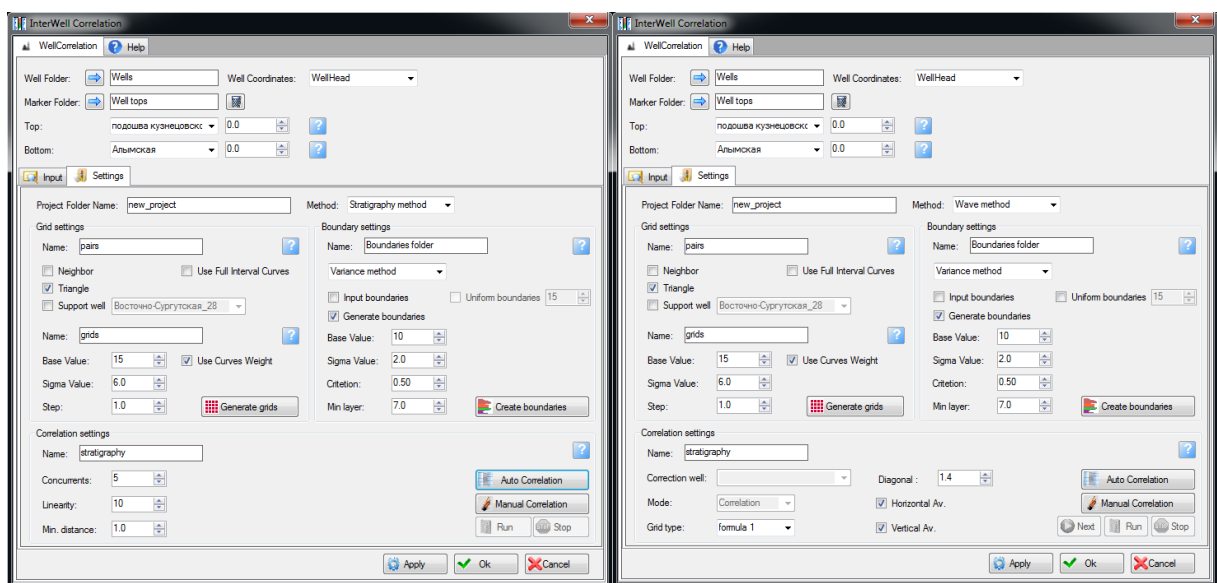


Рис. А. 5. Вкладка Settings. Справа настройки для стратиграфического метода, слева для волнового метода.

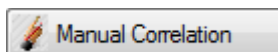
скважинах. Данный режим позволяет достраивать незаконченные корреляционные модели. Кроме того, также имеется еще один метод расстановки границ, который используется в алгоритме построения корреляционной модели с помощью волнового метода. Он включается с помощью переключателя Regular Boundaries. По данному методу границы будут равномерно расставлены по полученной корреляционной линии (волне) с заданным шагом. Шаг имеет значение – количество точек на кривой.

И последняя область задает параметры алгоритма построения корреляционной модели. Данный алгоритм не может быть начат, прежде чем будут построены карты меры различия и выделены границы для корреляции. В представленном модуле реализовано два алгоритма. Нужный алгоритм пользователь может выбрать в поле Method. Один алгоритм имеет имя Haites method, а другой Wave method. Для каждого из них имеется свой набор параметров. Они содержатся в области Correlation settings. Результатом этого алгоритма являются границы, прослеженные во всех исследуемых скважинах. Они помещаются в папку с именем указанным в поле Name, либо в случае если поле осталось пустым в папку Correlation boundaries.

Haites method поочередно прослеживает все выделенные границы опираясь на карты меры различия, при этом в первую очередь прослеживаются более явные границы. Параметры для этого алгоритма следующие: Concurrents – число границ среди которых выбирается лучшая граница, Linearity – коэффициент линейности и Min.distance – минимальное расстояние от прослеженной границы, попав в которое, следующая граница в алгоритме исключается из рассмотрения. Корреляция производится посредством кнопки

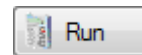


. Так же метод предоставляет ручной режим работы при нажатии



кнопки . В данном режиме пользователь может поочередно добавлять, редактировать и удалять прослеженную границу средствами Petrel в окне Well



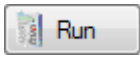


section, добавление границы производится нажатием кнопки



при этом пользователь может в любой момент закончить корреляцию нажатием кнопки



Второй метод корреляции Wave method осуществляет поиск пути минимального веса по карте из одного угла в другой. Данный алгоритм имеет следующие параметры: Diagonal – параметр указывающий добавочную стоимость прохождения пути по диагонали, Min. Distance – минимальное расстояние между прослеженными границами, а также тип формулы по которой происходит расчет следующей карты сходства между полученным путем и существующей картой сходства. У данного метода также возможно интерактивное вмешательство, на стадии построения пути, осуществляемое при нажатии

кнопки . Пользователь может устанавливать точки, через которые должен пройти путь по карте и после этого переходить к следующей карте. Для этого пользователь должен выбрать инструмент  и расставить необходимые точки на текущей рассчитанной карте и выполнить перерасчет. Расчет волны осуществляется при нажатии кнопки , а переход к следующей карте при нажатии кнопки . В любой момент пользователь может остановить процесс корреляции нажатием кнопки . В результате выделенные нами границы прослеживаются между скважинами в соответствии с построенным путем.