

Об идентификации границ пластов месторождений на основе результатов геофизических исследований скважин

М.А. Верхотуров
Факультет информатики и робототехники
Уфимский государственный авиационный
технический университет
Уфа, Россия
e-mail: verhotur@vmk.ugatu.ac.ru

О.М. Верхотурова
Факультет информатики и робототехники
Уфимский государственный авиационный
технический университет
Уфа, Россия
e-mail: lesia1984@mail.ru

Г.Н. Верхотурова
Факультет информатики и робототехники
Уфимский государственный авиационный
технический университет
Уфа, Россия
e-mail: verhoturova.gn@yandex.ru

Аннотация¹

В работе рассматривается задача идентификации границ пластов месторождений на основе результатов геофизического исследования скважин. Особенностью задачи является то, что опорные скважины считаются заданными, а также наличие нескольких наборов данных (каротажных кривых) для каждого узла (скважины). Для решения данной проблемы используются метод главных компонент, диаграммы Вороного, нахождение остовного дерева минимального веса и генетический алгоритм. Приведены примеры работы разработанного алгоритмического и программного обеспечения, а также результаты вычислительного эксперимента, проведенного для проверки эффективности разработанных методов и алгоритмов.

1. Введение

Одной из ключевых процедур, проводимых при геологоразведке новых нефтяных месторождений, является корреляция разрезов скважин. Основной задачей корреляции является идентификация структурных объектов – одноименных стратиграфических комплексов, горизонтов и пластов.

Труды Седьмой всероссийской научной конференции "Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений", 28-30 мая, Уфа-Ставрополь, Ханты-Мансийск, Россия, 2019

На результатах корреляции базируются все последующие процедуры создания геологических статических и гидродинамических двух- и трехмерных моделей залежей углеводородов. От качества проведения корреляции и построения структурной модели зависит эффективность разведки и разработки месторождений.

Одним из первых задачу идентификация (выделения) объектов рассмотрел и начал автоматизировать Губерман Ш.А. [1]. Губерманом Ш.А. был разработан алгоритм, который моделирует способность зрительного восприятия пренебрегать подробностями картины. Губерманом Ш.А. также были разработаны алгоритмы выделения пластов в геофизических разрезах скважин.

Подход, основанный на принципе триангуляционных сетей, был разработан коллективом Гутмана И.С. [2]. Он основан на опыте детальной корреляции и предусматривает парную корреляцию разрезов скважин на основе принципа триангуляционных сетей. В работах [3,4] описан расширенный подход, основанный на принципе триангуляционных сетей.

В работах коллектива Тененева В.А. для разделения геологического разреза на пласты используется нейросетевой метод [5].

Подход, основанный на учете «генетического признака», в частности на количественной оценке геофизических параметров с учетом их эволюции, разработан в коллективе В.М. Омелина [6].

В работе Р.А. Шайбакова [7,8] предлагается при идентификации трехмерных геологических объектов использовать вейвлет-анализ и нейросетевые технологии.

Н.С. Бурлаковым постановка задачи автоматической корреляции скважин формулируется как задача распознавания образов, с учетом разнородных геолого-геофизических данных [9].

Анализ существующих методов выявил, что они либо нуждаются в трудоёмкой настройке и адаптации к каждому конкретному набору входных данных, либо не учитывают ряд важных факторов, касающихся выбора исходной информации, геометрического расположения и др. Вышесказанное определяет актуальность дальнейшей разработки подходов для повышения эффективности решения проблемы идентификации границ пластов нефтяных месторождений.

2. Постановка задачи

Задача заключается в определении границы продуктивных пластов на эксплуатационных скважинах месторождения на основе сети опорных (разведочных) скважин, для которых эти границы известны. У каждой скважины есть различные данные ГИС, которые графически представлены каротажными кривыми. На опорных скважинах известны границы продуктивных пластов: верхняя граница – кровля пласта, нижняя граница – подошва пласта. Границы пластов также называются маркерами. По схожести участков каротажных кривых нужно найти эти границы на эксплуатационных скважинах месторождения [9,10].

3. Структура решения

Решение можно разбить на следующие последовательные этапы:

1. Формирование кривой для нахождения границ интервалов.
2. Сопоставление опорных и исследуемых узлов.
3. Нахождение границ интервалов в исследуемых узлах.

3.1. Формирование набора данных для нахождения границ интервалов

Дана область, в которой есть M опорных узлов и N – исследуемых. У каждого узла существуют всевозможные характеризующие его наборы данных, каждый из которых несет определенную информацию. Поэтому непонятно по какому именно набору данных искать границы интересующих нас интервалов.

Одним из известных универсальных средств анализа является метод главных компонент. Он применяется для снижения размерности пространства исходных переменных, не приводя к существенной потере информативности. Применение метода главных компонент позволяет перейти к новому ортогональному базису, оси которого ориентированы

по направлениям максимальной дисперсии набора входных данных.

Вдоль первой оси нового базиса дисперсия максимальна, вторая ось максимизирует дисперсию при условии ортогональности первой оси и т.д., последняя ось имеет минимальную дисперсию из всех возможных.

Такое преобразование позволяет понижать информацию путем отбрасывания координат, соответствующих направлениям с минимальной дисперсией.

Таким образом, в работе интервалы сравниваются не по исходным кривым, а по некоторой синтетической кривой, которую получают в результате применения метода главных компонент к данным всех узлов области (либо определенной части).

3.2. Сопоставление опорных и исследуемых узлов

Можно выделить следующие варианты выбора узлов:

- Парное сравнение узлов, когда с каждым опорным узлом поочередно сравниваются соседние исследуемые узлы, затем с ними сравниваются их соседние и т.д.
- Интегральное сравнение узлов, когда решение находится сразу во всех исследуемых узлах на основе известных значений в опорных узлах.

В работе был выбран принцип парного сравнения. При его использовании одним из решающих моментов является построение путей обхода узлов исследуемой области. В предположении, что наибольшим сходством обладают близлежащие узлы, а по мере удаления степень сходства постепенно уменьшается, были рассмотрены следующие варианты построения путей обхода узлов:

- Путь максимальной корреляции. Поиск начинается с опорного узла, вокруг него выбираются N самых близких по расстоянию узлов, для каждого из них находится решение (границы интервалов). Затем осуществляется переход к тому исследуемому узлу, у которого коэффициент корреляции с исходным узлом наибольший. Процесс повторяется до тех пор, пока для текущего узла наибольший коэффициент корреляции с соседними не станет меньше некоторого порогового значения, которое задается пользователем.
- Путь по профилям, составленным специалистами. Сравнение узлов можно проводить по уже составленным специалистами профилям (профиль – последовательность узлов, первый из которых является опорным), согласно которым и осуществляется парное сравнение характеризующих каждый узел кривых. В этом

случае также может задаваться пороговое значение, после достижения которого процесс прекращается.

- Путь по ячейкам. Поскольку в профилях расстояние от первого до последнего узла может быть значительным, характерные особенности узлов (форма кривых на рассматриваемых интервалах) по мере движения по профилю постепенно меняются, и корреляция падает. Поэтому было решено применять так называемую площадную корреляцию, при которой вся область разбивается на ячейки Вороного, после чего строятся пути обхода узлов внутри каждой ячейки.

Поскольку необходимо разбить всю рассматриваемую область так, чтобы каждый исследуемый узел относился к ближайшему к нему опорному, то решено было использовать диаграмму (ячейки) Вороного. Диаграмма Вороного конечного множества точек P на плоскости представляет такое разбиение плоскости, при котором каждая область этого разбиения образует множество точек, более близких к одному из элементов множества P , чем к любому другому элементу множества. В такой диаграмме любая точка внутри ячейки находится ближе к "центру" своей ячейки. Точки на границе равноудалены от "центров".

Формальное определение:

1. Пусть P – множество из n различных точек плоскости.
2. Диаграмма Вороного – деление плоскости на n ячеек, по одной на каждую точку P .
3. Точка q принадлежит ячейке, относящейся к p_i из P , если расстояние от q до p_i меньше, чем расстояние от q до любой другой точки P .

После разбиения всей области на ячейки Вороного необходимо построить пути обхода узлов внутри каждой ячейки. Поскольку предполагается, что каждый узел обладает наибольшим сходством с самым близким к нему по расстоянию узлом, а по мере увеличения расстояния сходство между узлами постепенно уменьшается, то предлагается строить пути, которые соединяют ближайшие друг к другу узлы. При этом все пути должны начинаться с опорного узла, и в каждый исследуемый узел должен вести только один путь.

Для нахождения таких путей обратимся к теории графов. Для начала внутри каждой ячейки Вороного нужно найти остовное дерево минимального веса (в данном случае, расстояния). Для этого используем алгоритм Прима.

Пусть ячейка содержит m узлов. Ребром будет называться отрезок, связывающий два узла. Весом

ребра – расстояние между узлами, которые оно соединяет.

После построения остовного дерева минимального расстояния нужно построить пути обхода узлов по этому дереву. При этом каждое ребро должно входить только в один путь. Для этого используем алгоритм поиска в глубину.

Алгоритм нахождения пути обхода скважин на основе построенного дерева

Входные данные:

$Tree$ – матрица смежности, которая содержит 1 на пересечении тех скважин, которые связаны ребром в построенном дереве, и 0 – не связаны.

Выходные данные:

$Ways$ – пути обхода скважин.

НАЧАЛО

Записываем все скважины кроме опорной в список необработанных not_select ;

Считаем опорную скважину текущей cur ;

Записываем опорную скважину в текущий путь $way = cur$;

ПОКА $not_select \neq []$ ДЕЛАТЬ

ЕСЛИ $cur == []$ (нет текущей скважины), ТО

Считаем за текущую скважину cur последнюю скважину, занесенную в стек;

Начинаем с нее текущий путь $way = cur$.

Находим по матрице смежности еще необработанные скважины, в которые можно перейти из текущей – список $next$;

ЕСЛИ $size(next) > 1$ (таких скважин несколько), ТО

Заносим текущую скважину cur в стек $stack$;

Переходим в первую скважину из $next(1)$;

Считаем ее текущей $cur = next(1)$;

Добавляем ее в текущий путь $way = [way\ cur]$;

Удаляем ее из списка необработанных;

ИНАЧЕ ЕСЛИ $size(next) == 1$ (можно перейти только в одну скважину), ТО

ЕСЛИ $cur \in stack$ (текущая скважина в стеке), ТО

Извлекаем ее из стека;

Переходим в скважину $next$;

Об идентификации границ пластов месторождений на основе результатов геофизических исследований скважин

Считаем ее текущей $cur = next(1)$;

Добавляем ее в текущий путь $way = [way\ next(1)]$;

Удаляем ее из списка необработанных;

ИНАЧЕ (нет скважины, в которую можно перейти, тупик)

Запоминаем текущий путь;

Обнуляем текущий путь $way = []$;

Обнуляем текущую скважину $cur = []$;

КОНЕЦ

В результате получим пути, которые затем будем обходить в таком порядке, чтобы каждый путь начинался с узла, в котором границы интервалов уже известны.

Для выделения интервалов и формирования вывода о схожести определенных участков сравниваемых кривых в предлагаемом подходе применяется коэффициент корреляции.

3.3. Нахождение границ интервалов в исследуемых узлах

Поиск осуществляется таким образом, что одновременно ищутся границы только одного интервала, при этом интервалы выделяются последовательно друг за другом.

Каждое решение состоит из верхней границы интервала Top и ширины интервала Dh , в результате определяется нижняя граница интервала $Bot = Top + Dh$.

Кривые двух сравниваемых узлов приводятся к сопоставимому виду, после чего на основе опорного узла задаются допуски, в пределах которых могут находиться границы интервала в исследуемом узле.

Пространство поиска задается диапазоном возможных значений $[Top - \frac{\Delta_1}{2}; Top + \frac{\Delta_1}{2}]$, в пределах которых может лежать верхняя граница и дельтой Δ_2 , в которой может находиться ширина интервала $[Dh - \frac{\Delta_2}{2}; Dh + \frac{\Delta_2}{2}]$. Затем осуществляется поиск в получившемся пространстве возможных решений.

Поиск можно осуществлять как точными, так и эвристическими методами [11].

Предлагается два альтернативных метода:

- полный перебор (в случае, если пространство решений небольшое, и можно найти решение за приемлемое время);

- генетический алгоритм (ГА).

Полный перебор является точным методом, который всегда находит оптимальное решение в заданном пространстве возможных значений, но при большом диапазоне поиска требует значительных затрат времени и вычислительных ресурсов.

Генетический алгоритм является наиболее распространенным метаэвристическим методом, он не гарантирует нахождения оптимального решения, но асимптотически сходится к нему. Более приемлем с точки зрения временных и вычислительных затрат.

Поскольку ГА является универсальным методом, основная сложность в том, что нужно правильно закодировать исходные данные и настроить алгоритм под решение данной конкретной задачи.

Для данной задачи в генетическом алгоритме каждая хромосома представляет собой решение:



Популяция – это множество таких решений.

В качестве целевой функции выступает коэффициент корреляции. Кроме того, на каждый ген накладываются ограничения, в пределах которого он может изменяться.

Коэффициент корреляции позволяет находить сходные интервалы, но не является точным параметром при определении границ интервалов. Поэтому для уточнения границ необходимы дополнительные критерии.

Один из возможных вариантов – учет знака первой производной для определения положения границы интервала:

- Если знак производной на границе положительный, то граница стоит на подъеме;
- Если знак отрицательный, то на спуске;
- Если производная на границе интервала равна 0, то граница стоит на пике.

В процессе поиска определяются знаки первой производной на границах интервалов в опорном узле. В результате в исследуемом узле рассматриваются возможные положения границ только с такими же знаками первой производной, что ограничивает пространство возможных решений.

3. Вычислительный эксперимент

Для оценки качества разработанных алгоритмов были проведены вычислительные эксперименты с использованием различных типов данных ГИС (различные каротажные кривые).

Выделение пластов проводилось на основе следующих данных:

- Данные *SP* – каротаж потенциалов самопроизвольной поляризации (ПС) – один из основных методов электрического каротажа, основанный на изучении естественного стационарного электрического поля в скважинах. Он позволяет решать обширный круг задач, в том числе, задачи, связанные с изучением литологии пород, установлением границ пластов и проведением корреляции разрезов.
- Данные *IK* – индукционный каротаж – один из методов электрического каротажа, основанный на измерении кажущейся удельной электропроводности горных пород при помощи индуцированных токов.
- Синтетический показатель – синтетическая каротажная кривая, полученная с помощью метода главных компонент из данных *SP* и *IK*.

Для нахождения решения использовались следующие параметры:

- Для сравнения использовались различные виды каротажных диаграмм и их сочетания. В данном примере приведены результаты поиска по данным *SP*, *IK* и синтетической кривой (из *SP* и *IK*).
- Поиск осуществлялся по ячейкам.
- Для нахождения границ пластов использовался метод, основанный на корреляции, и полный перебор в связи с небольшой мощностью пласта и, следовательно, удовлетворительным временем работы алгоритма.
- Поиск осуществлялся с учетом знака первой производной на границах пласта и положения границ выше или ниже среднего значения на интервале.

Выводы: Результаты эксперимента (Таблица 1) показали, что значение коэффициента корреляции, полученного при использовании синтетической кривой (из данных *SP* и *IK*) выше, чем значения коэффициентов корреляции, полученных при использовании данных *IK* и *SP* по отдельности. Это говорит о том, что МГК выделяет необходимую информацию из исходных данных, и в итоге синтетическая кривая дает более точный и надежный результат, чем исходные данные по отдельности.

Таблица 1 – Результаты эксперимента

Показатель	Данные <i>SP</i>	Данные <i>IK</i>	Синтетический показатель
Коэффициент корреляции по месторождению	0,723	0,441	0,779

Однако следует подчеркнуть, что метод главных компонент имеет смысл использовать в том случае,

Об идентификации границ пластов месторождений на основе результатов геофизических исследований скважин

если по месторождению есть несколько видов данных ГИС хорошего качества, и на каждой из каротажных кривых пласт четко выделяется. При комбинировании данных различного качества можно «зашумить» хорошие данные плохими. В таком случае коэффициент корреляции, полученный с помощью МГК, будет ниже, чем по каротажу хорошего качества.

Сравнение методов дискретной оптимизации (полного перебора и генетического алгоритма)

В некоторых ситуациях пласты на месторождениях имеют значительную мощность, тогда нахождение решения с помощью полного перебора занимает много времени и требует значительных вычислительных затрат. В этом случае для нахождения решения целесообразнее использовать генетический алгоритм.

Для проверки качества получаемых решений с помощью ГА была проведена серия экспериментов с использованием данных Комсомольского месторождения (Таблица 2).

Таблица 2 – Информация по пласту

Количество опорных скважин	Количество эксплуатационных скважин	Используемые данные ГИС	Шаг дискретизации каротажа	Средняя мощность пласта
20	120	<i>SP</i>	0.2 м	45.3 м

В процессе поиска решения применялись следующие подходы:

- Для сравнения скважин использовались различные виды каротажных диаграмм и их сочетания. В данном примере приведены результаты поиска по данным *SP*.
- Поиск осуществлялся по ячейкам.
- Для нахождения решения использовался метод, основанный на корреляции.
- При поиске с помощью метода, основанного на корреляции, тестировались полный перебор и генетический алгоритм (с различным количеством итераций).
- Поиск осуществлялся с учетом знака первой производной на границах пласта и положения выше или ниже среднего значения на интервале.

Результаты представлены в виде следующей таблицы (Таблица 3):

Таблица 3 – Результаты экспериментов

	100 итер.	500 итер.	1000 итер.	Полный перебор
Коэффициент корреляции	0.6185	0.6288	0.6326	0.6389

% от лучшего решения	96.8%	98.4%	99%	100%
----------------------	-------	-------	-----	------

Результаты эксперимента показали, что генетический алгоритм за 1000 итераций не нашел оптимального значения, тем не менее, полученные значения отличаются от оптимума лишь на 1-5%. Поэтому в случае большого пласта, когда полный перебор требует значительных временных и вычислительных затрат, ГА позволяет находить решение, близкое к оптимальному, за приемлемое время. Количество итераций следует задавать исходя из требуемой точности.

Поскольку ГА является универсальным методом, основная сложность в том, что нужно правильно закодировать исходные данные и настроить алгоритм под решение данной конкретной задачи.

В ходе экспериментов рассматривались различные варианты параметров алгоритма, в том числе и различные варианты операторов кроссовера и мутации.

Испытания проводились на различных скважинах, для каждого варианта сочетания кроссовера и мутации было сделано порядка 100 запусков.

Результаты представлены в виде гистограмм. По результатам экспериментов самые лучшие результаты показала комбинация: мутация – *user_mutation-0,7* (0,7 – вероятность мутации) и кроссовер – *SBX-4* (Рисунок 1). Именно эти параметры и использовались при нахождении решения с помощью генетического алгоритма.

Кроссовер – *SBX-4*

Мутация – *user_mutation-0,7*.

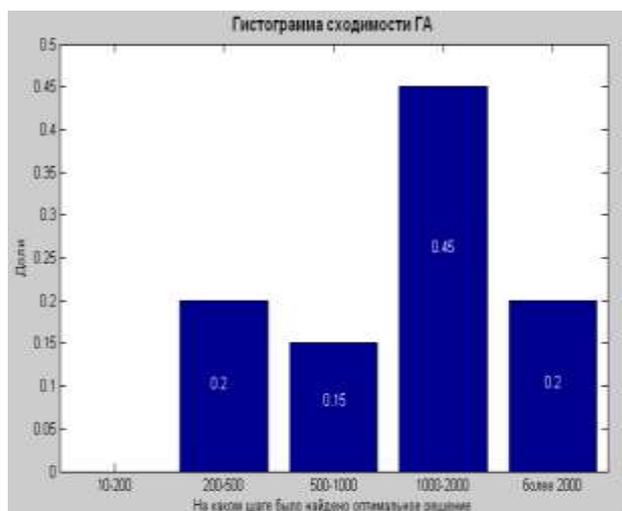


Рисунок 1- Гистограмма сходимости ГА

4. Заключение

В статье рассмотрена задача идентификации границ пластов месторождений на базе результатов геофизических исследований скважин. В качестве основных выводов можно отметить следующее:

1. Процесс решения задачи включает в себя несколько последовательных этапов, в рамках которых предлагаются следующие методы и алгоритмы:
 - Метод главных компонент для формирования синтетической кривой.
 - Парное сравнение узлов – разбиение области на ячейки Вороного и построение путей внутри каждой ячейки.
 - Методы нахождения границ интервалов – полный перебор и генетический алгоритм.
 - Предлагается уточнять границы пласта – учитывать знак первой производной в границах, а также расположение выше или ниже среднего значения на интервале.
2. На базе разработанных методов и алгоритмов создан программный продукт, позволяющий в автоматическом режиме решать задачу выделения границ продуктивных пластов на скважинах месторождения.
3. Для проверки качества разработанных методов и алгоритмов проведена серия вычислительных экспериментов, а также сравнение полученных решений с результатами получаемыми экспертами (геологами) в результате ручного выделения границ пластов. Эксперименты показали эффективность разработанных алгоритмов, позволяющих улучшить решение в среднем на 5-15% в зависимости от месторождения и выделяемого пласта, при значительной экономии затраченного времени.

Список использованных источников

1. Губерман Ш.А. Неформальный анализ данных в геологии и геофизике. – М.: Недра, 1987. – 261 с.
2. Гутман И.С. и др. Объединенная автоматизированная технология корреляции скважин по данным ГИС // Тезисы докладов Международной геофизической конференции Санкт-Петербург. 2010. –Т. 2010.
3. Kovalevskiy E.V., Gogonenkov G.N., Perepechkin M.V. Automatic well-to-well correlation based on consecutive uncertainty elimination //69th EAGE Conference, London. – 2007. – H038. – http://www.centralgeo.ru/index.php?page=dvgeocorr_e
4. Ковалевский Е.В., Гогоненков Г.Н., Перепечкин М.В. Уточнение геологических моделей

посредством использования автоматической корреляции скважин // Недропользование XXI век, 2007, №4. – С. 28-31.

5. Тененев В.А. и др. Интеллектуальные системы интерпретации данных геофизических исследований скважин // Искусственный интеллект. – 2002. – №3. – С. 439-447.
6. Интерактивная корреляция геологических разрезов по данным ГИС / В.М. Омелин и др., 1989, Вып.8. –С.102-118.
7. Шайбаков, Р.А. Использование нейросетевого аппарата для идентификации границ геологических объектов / Р.А. Шайбаков // материалы международной заочной научной конференции «Технические науки: традиции и инновации». –Челябинск: Изд-во «Молодой ученый», 2012. –С. 8–11.
8. Шайбаков Р. А. Разработка комплексного метода детальной автокорреляции разрезов скважин [Текст]/Р.А./Шайбаков//Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело».-2013.-Вып.5.- С.131-151.
9. Бурлаков Н.С. Новые методы для автоматической корреляции геологических разрезов скважин / Н.Бурлаков // Вопросы современной науки и практики. Университет имени В.И. Вернадского. – 2014 – №1. – С. 142-145.
10. Байков В.А., Борисов Г.А., Верхотурова О.М., Надеждин О.В. Современные методы анализа геофизических исследований скважин // Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть». – Москва, 1-2007. – С. 27-31.
11. Верхотурова О.М., Верхотуров М.А. Об одном решении задачи идентификации границ слабоструктурированных естественных объектов // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2016): труды Международной научно-технической конференции. Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2016. С. 56-60.