

КОРРЕЛЯЦИЯ РАЗРЕЗОВ СКВАЖИН КАК МНОГОМЕРНАЯ ОПТИМИЗАЦИОННАЯ ЗАДАЧА

В.В. Лапковский^{1,2}, А.В. Истомин¹, В.А. Конторович^{1,2}, В.А. Бердов¹

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

² Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

Рассматривается вариант автоматической корреляции разрезов скважин, основанный на построении многомерных функций различия фрагментов графиков каротажных кривых. Решение получается либо путем последовательной корреляции отдельных границ с учетом проективной модели Хейтса и определением положения границы в минимуме функции различия, либо путем построения линий оптимальных траекторий на двумерном планшете Жековского. Алгоритмы реализованы в виде программного модуля оригинальной среды интерпретации скважинных данных, а также комплектом средств разработки Ocean в виде плагина автоматической корреляции для комплекса Petrel компании Шлюмберже.

Автоматическая корреляция, интерпретация ГИС, оптимальная корреляция, сопоставление скважин.

CORRELATION OF WELL LOGS AS A MULTIDIMENSIONAL OPTIMIZATION PROBLEM

V.V. Lapkovsky, A.V. Istomin, V.A. Kontorovich, and V.A. Berdov

We consider the variant of automatic correlation between well sections based on construction of multi-dimensional functions of differences between fragments of logs. The solution is obtained either by successive correlation between the boundaries with regard to the projective model of Haites and definition of the boundary position at the minimum of the difference function or by construction of the lines of optimal trajectories on a 2D Zhekovskii's plot. These algorithms are implemented as a program package for original interpretation of well data and as a plug-in for automatic correlation module of the Schlumberger Petrel software using the Ocean development tools.

Automatic correlation, well log interpretation, optimal correlation, comparison of wells

ВВЕДЕНИЕ

Попытки создания автоматизированных систем корреляции слоев в разрезах скважин с разной степенью успешности предпринимались с 60-х годов прошлого века. Необходимость подобного инструмента стала особенно насущной при изучении закрытых территорий, где основную информацию об осадочных толщах поставляют каротажные данные скважин и сейсмические исследования [Киричкова и др., 2007]. Выход сборника статей [Сейсмическая стратиграфия..., 1982] дал импульс для развития методов отождествления сейсмических горизонтов со стратиграфическими границами, а также особенностей структуры волновых полей со строением осадочных толщ в различных фациальных условиях. Появились и новые направления стратиграфических исследований, основанных на результатах непрерывного прослеживания геологической среды, — сеймостратиграфия [Сейсмическая стратиграфия..., 1982] и секвенная стратиграфия [Маргулис, 2008]. Для этих направлений, изначально основанных на использовании цифровых геофизических данных, предлагается широкий выбор компьютерных технологий, встроенных в интегрированные системы геологического моделирования. Однако большая часть реализованных технологических решений дают интерпретатору некоторый набор инструментов анализа, редактирования и визуализации скважинных данных. Выбор варианта корреляции и собственно идентификация пластов и границ в разных скважинах — прерогатива специалиста и зависит от его установок, опыта, «искусства чтения» каротажных кривых. Если на месторождении имеются сотни или тысячи скважин, то построение детальной корреляционной модели, даже в технологически совершенной инструментальной среде, становится весьма трудоемкой задачей, требующей многодневных усилий опытного специалиста. В связи с этим особую значимость приобретает разработка эффективных компьютерных технологий принятия решений по стратиграфической идентификации слоев. Большая часть

из предпринятых в этом направлении попыток оказались неудачными, что позволило даже сравнивать создания автоматических систем корреляции с проблемой вечного двигателя [Кашик и др., 2010].

Тем не менее сейчас существуют два признанных, технологически весьма продвинутых решения, позволяющих доверить корреляционные сопоставления компьютеру. Одно из них реализовано в системе DV Geo Центральной геофизической экспедиции [Ковалевский и др., 2007], другое (AutoCorr) — создано в РГУ нефти и газа [Гутман и др., 2006, 2010]. Несмотря на то, что эти решения существенно отличаются друг от друга, в их основе лежит общий подход — корреляционное сопоставление пары 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 скважины к другой и определяя в них стратиграфические аналоги, можно выбрать разные маршруты, которые иногда приводят к существенно отличающимся решениям. Для согласования парных сопоставлений скважин в непротиворечивую корреляционную модель в системе DV Geo предлагается сложный алгоритм локального исправления вариантов корреляции. В программном продукте AutoCorr при возникновении существенных невязок соответствующие ребра графа маркируются цветом на планшете и специалисту предлагается в ручном режиме разрешить имеющиеся конфликты парных сопоставлений.

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

ПРИНЦИП КОРРЕЛЯЦИИ СЛОЕВ ДЛЯ ПАРЫ И ГРУППЫ СКВАЖИН

В основе используемого подхода лежат три основные конструкции.

1. Перспективная (проективная) корреляционная модель Т.Б. Хейтса [Haites, 1963; Салин 1979].
2. Парное оптимальное корреляционное сопоставление, предложенное Б. Жековским [1963]. Эта работа была опубликована в виде короткой статьи в издании временного библиотечного хранения и сейчас она практически недоступна. Подход Б. Жековского получил развитие в работах отечественных авторов [Губерман, Овчинникова, 1972; Гришкевич, 1984; Гутман и др., 2006, 2010; Кашик и др., 2010]. Подобное решение было исследовано также в [Lineman et al., 1987] и реализовано в виде программного продукта, выполняющего попарную корреляцию скважин [Mirowski et al., 2005].
3. Меры сходства-различия для сравнения фрагментов разрезов коррелируемых скважин. Используются модифицированные меры, предложенные для интервального сравнения каротажных кривых [Вистелиус, Романова, 1962; Губерман, Овчинникова, 1972].

КОРРЕЛЯЦИЯ ДЛЯ ПАРЫ СКВАЖИН

Планшет (или двумерная функция различия) строится для одной или нескольких каротажных кривых. При этом принимаются следующие допущения и ограничения:

1. Пусть $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ — область евклидова пространства E_N глубин всех скважин, ограниченная интервалом корреляции. В качестве каротажных кривых будем рассматривать ограниченные вещественные функции вида $g(x) \in C(R^1)$, где $x \in R^1$ — любой из видов глубин, применяемый для представления скважинных данных. Эти данные могут быть получены по результатам измерений прибором непосредственно в скважине (на кабеле или обсадных трубах). Кроме того, применимы произвольные преобразования исходного каротажа (например $v(g(x)) \in C(R^1)$, где $x \in R^1$), что делает возможным сравнение скважин на основе каротажа, «очищенного» от влияния характера насыщения пласта, технологических факторов, таких как тип бурового раствора, конструкция ствола скважины, время проведения измерений.

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

3. По каждой из сравниваемых каротажных кривых для построения планшета Жековского используется один из двух методов вычисления расстояний, определяемых следующим образом. Пусть x_1 — значение глубины центральной точки интервала в первой из сравниваемых скважин, x_2 — во второй, A — длина интервала, s — переменная, по которой происходит интегрирование от $-A/2$ до $A/2$, а g — ка-

ротажная кривая, заданная в обеих скважинах и для которой вычисляется расстояние, $w(s)$ — весовая функция, тогда

$$f_d(x_1, x_2) = \sqrt{\frac{\int_{-A/2}^{A/2} w(s) [(g_1(x_1+s) - g_2(x_2+s))]^2 ds}{\int_{-A/2}^{A/2} w(s) ds}}. \quad (1)$$

В качестве весовой функции использовалась функция Гаусса $w(s) = e^{-s^2/2\sigma^2}$ с задаваемым внешним параметром σ , т.е. $w(s)$ также ограничена и непрерывна на интервале интегрирования.

Другой вид функции расстояния определяется через взвешенные скользящие коэффициенты корреляции:

$$f_c(x_1, x_2) = \frac{1 - K(g_1(x_1), g_2(x_2))}{2}, \quad (2)$$

где $K(g_1(x_1), g_2(x_2))$ — вычисленный в интервале от $-A/2$ до $A/2$ окрестностей сравниваемых точек коэффициент корреляции между каротажными кривыми $g_1(x_1)$ и $g_2(x_2)$, описывающими одно и то же свойство в различных скважинах, например, кривую ПС.

4. Вычисления по нескольким типам каротажных кривых функций различия сводятся к взвешенному осреднению функций различия, полученных для каждой кривой по отдельности. Например, при построении планшета можно учесть непохожесть фрагментов разреза по ПС и ГК одновременно. Планшет, построенный по этим двум типам каротажных кривых, показан на рис. 1, а.

Рис. 1 иллюстрирует принцип построения корреляционного решения на примере части нижнехетской и суходудинской свит для двух скважин Сузунской площади северо-востока Западной Сибири. Карта на рис. 1, а соответствует значению функции меры различия сравниваемых фрагментов скважин $f(x_1, x_2)$. Здесь x_1 и x_2 — глубины центральных точек этих фрагментов. Черная диагональная линия — оптимальный вариант корреляции. Данная линия, обозначим ее L , является решением оптимизационной задачи

$$\int_L f(x_1, x_2) dL \rightarrow \min, \quad (3)$$

имеющей решение в силу свойств функций (1) или (2).

В центральной части представленной модели экспертно задана одна из стратиграфических границ — кровля нижнехетской свиты. Таким образом, ограничиваются допустимые варианты решения, а соответствующая стратиграфическая граница (или несколько границ) разделяет области на те, где корреляционные сопоставления возможны и могут быть вычислены коэффициенты различия, и те, где такие построения невозможны (см. рис. 1, а, белая заливка).

Модель сопоставления разрезов скважин получается как результат построения оптимальной траектории в поле функции $f(x_1, x_2)$ и решения задачи (3). Для построения оптимальной линии применялись алгоритмы «муравьиной колонии» [Dorigo, 1992] и волновой алгоритм [Lee, 1961]. Точки этой линии — это значение пар глубин сравниваемых скважин, которые по набору используемых каротажных кривых минимально отличаются друг от друга. Соответственно, каждую из точек можно представить как отрезок, соединяющий две глубины в сравниваемых скважинах (см. рис. 1, б). Преимуществом такого метода является то, что оптимизация проходит по всему интервалу построения решения, т.е. слои сравниваются не по отдельности для нахождения своих аналогов, а совместно.

При решении задачи для нескольких скважин используются многомерные функции различия. Как уже упоминалось выше, это позволяет избежать возникновения невязок корреляционных сопоставлений, неминуемых при последовательном попарном сравнении скважин. Многомерное различие характеризует общую близость разрезов всех сравниваемых скважин для некоторого вектора глубин — $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. Примером многомерной меры различия можно считать дисперсию. Сложность конструирования подобной меры для каротажных кривых состоит в том, что мы не имеем средних значений, обычно используемых при вычислении дисперсии. Кривой средних значений, с которыми можно сравнивать результаты скважинных измерений, не существует, а построить ее можно только, используя результаты корреляции. В то же время имеется большое число оценок различий для всех сравниваемых пар скважин. Они могут использоваться как некоторый базис при конструировании многомерных функций различия, в которых аргументом служит вектор произвольных глубин группы соседних скважин. Допустимость оценки статистических параметров пространственных данных на основе парных различий отдельных образцов обосновывается в геостатистике. Именно так строятся вариограммы, позволя-

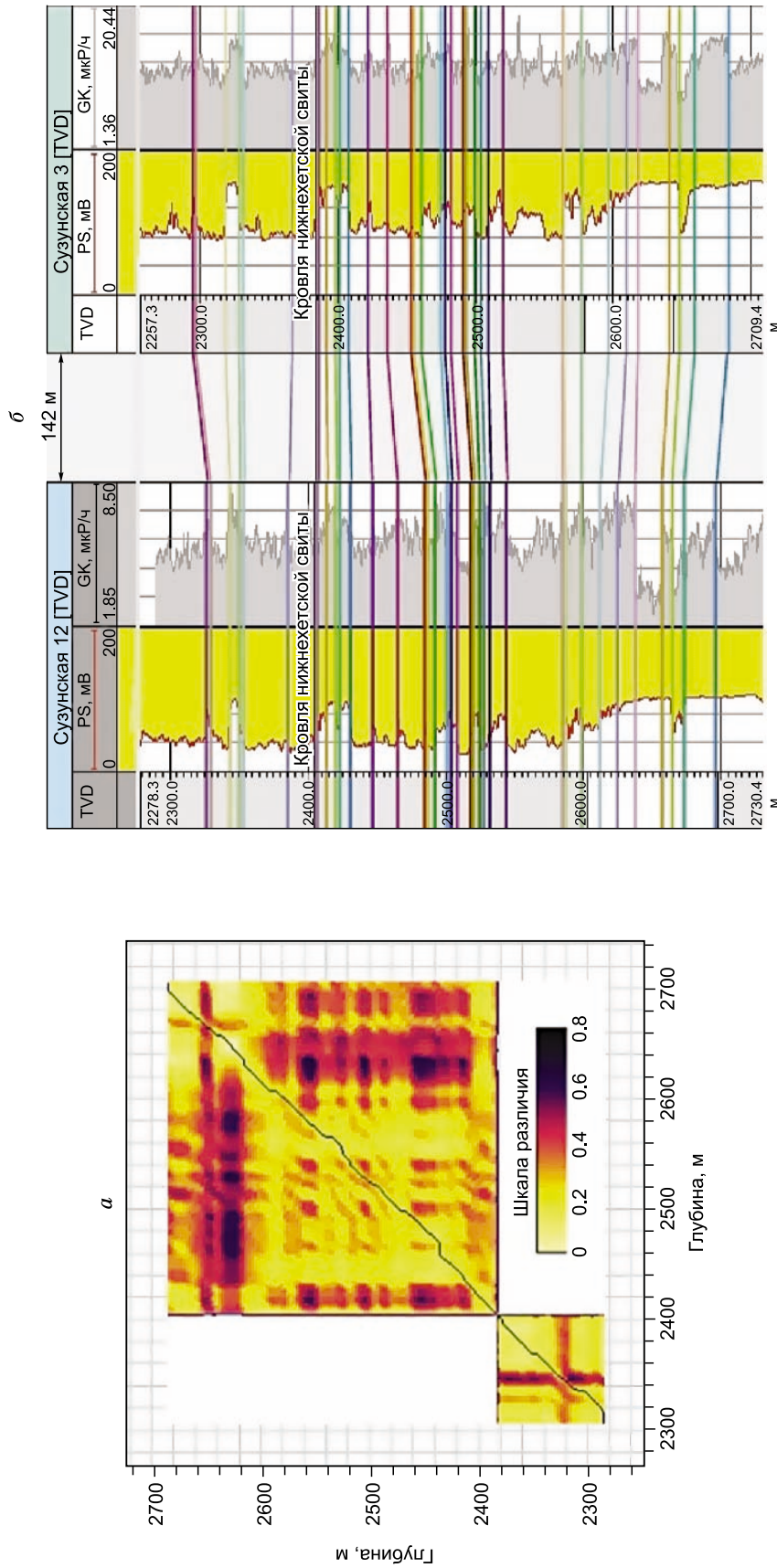


Рис. 1. Корреляционная модель сопоставления разрезов двух скважин.

а — в виде планшета Жековского, по оси *x* относительные глубины скв. Сузунская 12, по оси *y* — скв. Сузунская 3, черная линия — оптимальная корреляция; *б* — прокоррелированные разрезы скважин, соединенные в разных скважинах уровни глубин соответствующих отдельным точкам оптимальной линии (см. часть *а*). TVD — вертикальная глубина.

ющие оценить дисперсии и ковариации пространственных данных. Возможность прямого вычисления дисперсии, ковариации и корреляции по набору парных разностей без вычисления средних показана в работе [Чечулин, 2011]. В частности, для дисперсии им доказывается формула

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

где n число образцов, а x_i и x_j — значения некоторой случайной переменной, измеренные на этих образцах.

В реализованных алгоритмах автоматической корреляции мы использовали два вида мер различия. Первая является евклидовым расстоянием:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sqrt{\sum [f(x_i, x_j)w_{ij}]^2}. \quad (4)$$

Здесь $f(x_i, x_j)$ — все вычисленные функции парных мер различия, а w_{ij} — индивидуальные веса каждой из них. Другая мера среднегеометрического типа, она определяется следующим выражением:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum w_{ij} \sqrt{\prod w_{ij} \cdot f(x_i, x_j)}. \quad (5)$$

Веса w_{ij} в (4) и (5) задаются отличными от нуля для скважин, где корреляционное решение уже получено, а также для скважины, в которой оно ищется в данный момент. Во всех остальных скважинах вес задается равным нулю.

Решение оптимизационной задачи для всего множества скважин можно представить в виде

$$\int_L F_X(x_1, x_2, \dots, x_N) dL \rightarrow \min.$$

Однако, поскольку ее решение является в вычислительном плане крайне ресурсоемкой задачей, так как размерность пространства E_N и число дискретных измерений в интервале корреляции могут достигать нескольких тысяч, то был предложен последовательный метод решения данной задачи. На каждом шаге решается следующая оптимизационная задача:

$$\int_{L^{k+1}} F_X^{k+1}(\bar{\mathbf{x}}^k, x_i) dL^{k+1} \rightarrow \min, \quad (6)$$

где $k = \overline{1, N-1}$ — размерность подпространства, совпадающая с номером шага, $\bar{\mathbf{x}}^k$ — вектор скважин, зафиксированных на предыдущем шаге, x_i — свободный член, L^{k+1} — кривая в пространстве E_{k+1} , являющаяся линией оптимальной корреляции (многомерная корреляционная линия, по [Гришкевич, 1984]).

ПРОЦЕСС ПОСТРОЕНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ГРУППЫ СКВАЖИН

Задача сопоставления слоев отдельных границ для нескольких скважин решается в одном из двух процессов (либо их последовательностью).

1. Прослеживание отдельных наиболее выразительных границ от скважины к скважине, для чего в качестве начального приближения используется модель Хейтса, а затем положение границы уточняется, и она привязывается к локальному минимуму многомерной функции различия с учетом допустимых уровней отклонения и некоторого заданного параметра линейности.

2. Получение решения на всем интервале глубин путем построения оптимальной корреляции на планшете Жековского. На первом шаге в модель объединяются две скважины, у которых имеется вычисленная парная мера различия. Корреляционной линией здесь является упорядоченный набор векторов из двух значений глубин (первой и второй скважин). Далее эту линию «распрямляем» (параметризуем ее длину) и она становится одной из осей планшета следующего шага, т.е. по этой оси откладываем значения глубины отдельной скважины, а зависимые пары значений. По другой оси измеряем глубины в скважине, которая на данном шаге присоединяется к имеющейся модели. В результате получаем оптимальную корреляционную линию как упорядоченный набор векторов уже из трех значений глубин. Процесс повторяется до присоединения всех скважин к общему решению. Особенностью данного подхода является то, что на каждом шаге находится оптимальное сопоставление скважины с ее соседями по всему диапазону заданных глубин. В этом принципиальное отличие метода от ситуации, когда ищется лучшее сопоставление различных слоев по отдельности.

При стратиграфической интерпретации границы слоев могут быть расставлены автоматически, для чего используется один из ранее реализованных критериев фрагментации разрезов скважин [Бердов и др., 2012].

Пример автоматической корреляции части суходудинской и нижнехетской свит на Сузунской площади северо-востока Западной Сибири показан на рис. 2. При построении данной модели решение конструировалось не на профиле путем сравнения только соседних скважин, а учитывались взаимоотношения каждой скважины с ее окружением на площади месторождения. Получаемые корреляционные модели позволяют непосредственно вычислять ряд геометрических параметров слоистой толщи, и именно строить структурные карты по любым корреляционным уровням, карты толщин и карты средних значений результатов каротажных измерений по любому стратиграфическому диапазону.

Опыт применения автоматических технологий корреляции скважин показывает, что иногда возникают не вполне обоснованные сопоставления (особенно это характерно при использовании разнородных, неполных или некондиционных данных). Контроль качества построений может оперативно осуществляться путем анализа полученных корреляционных моделей как представляемых в виде разрезов, так и на вычисляемых картах гипсометрии границ, толщин и средних значений каротажных кривых в контролируемых стратиграфических диапазонах.

ВЫВОДЫ

В настоящее время изложенный подход имеет два программных воплощения — в виде модуля в продукте GISWell ИНГГ СО РАН и в виде плагина для комплекса Petrel компании Шлюмберге. В каж-

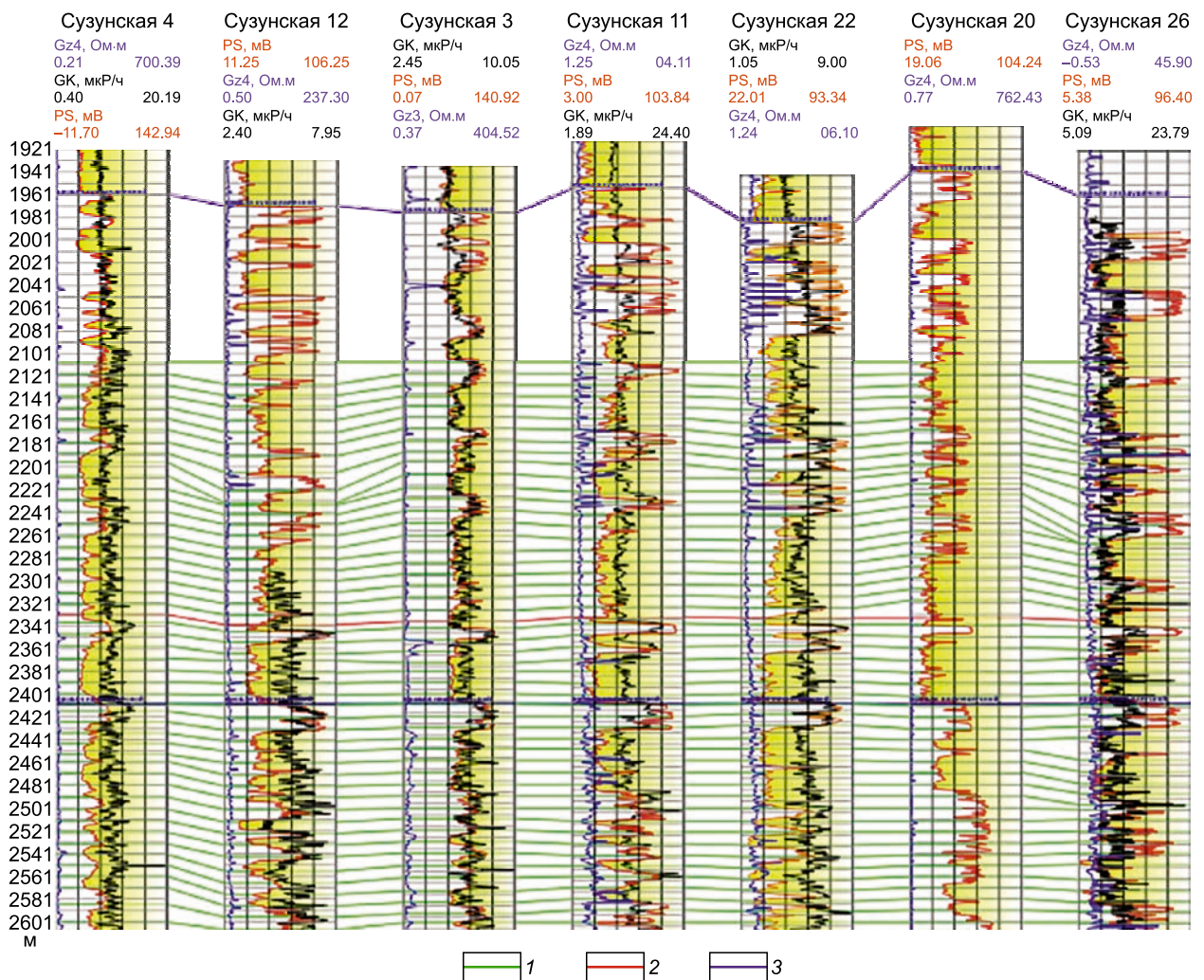


Рис. 2. Пример корреляции части суходудинской и нижнехетской свиты для группы скважин на Сузунской площади, по данным ГИС, в среде GISWell.

1 — созданные корреляционные линии; 2 — выделенная корреляционная линия, фиксируемая в виде новой стратиграфической границы; 3 — изначально заданные стратиграфические границы (кровли суходудинской и нижнехетской свит).

дой реализации допускается решение задачи описанными выше процессами, а также возможна ручная коррекция модели на промежуточных и финальной стадиях построения модели.

Дальнейшее развитие технологий, связанных с предлагаемым подходом, видится в использовании результатов стратиграфической интерпретации сейсмических данных для минимизации неопределенности корреляционных построений.

ЛИТЕРАТУРА

Бердов В.А., Власов А.А., Лапковский В.В. Выделение пластов межскважинного пространства по данным каротажа в программном комплексе Petrel // 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, СГГА, 2012, с. 76—81.

Вистелиус А.Б., Романова М.А. Красноцветные отложения полуострова Челекен (литостратиграфия и геологическое строение). М., Л., Изд-во АН СССР, 1962, 227 с.

Гришкевич В.Ф. Изложение задачи корреляции большого числа скважин в терминах теории расчлененных алгоритмов // Методы математического моделирования при решении прикладных задач нефтяной геологии. Тюмень, ЗапСибНИГНИ, 1984, с. 15—19. (Тр. ЗапСибНИГНИ, вып. 192).

Губерман Ш.А., Овчинникова М.И. О машинной корреляции пластов в разрезе скважин по геофизическим данным // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1972, № 3, с. 87—94.

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». 2006, 9 с. http://www.autocorr.stargeo.ru/autocorr/Art2006_10.pdf

Гутман И.С., Балабан И.Ю., Постнова О.В., Саакян М.И. Программный комплекс ACDV для изучения осадконакопления в залежах углеводородов сложного геологического строения // Геофизика, 2010, № 4, с. 17—25.

Жековский Б. Новый метод стратиграфической корреляции // Экспресс-информация «Нефтепромысловое дело». М., ВИНТИ, 1963, № 31, реферат № 135, с. 22—27.

Кашик А.С., Гогоненков Г.Н., Перепечкин М.В., Ковалевский Е.В., Гутман И.С., Балабан И.Ю., Кузнецова Г.П., Староверов В.М. Объединенная автоматизированная технология корреляции скважин по данным ГИС // Четвертая Международная конференция и выставка «К новым открытиям через интеграцию геонаук». Россия, г. Санкт-Петербург, 05—08 апреля 2010 г. 2010.

Киричкова А.И., Чижова В.А., Шашкова Э.К., Фортунатова Н.К., Шурыгин Б.Н. Стратиграфия в нефтяной геологии: методология исследований и актуальные проблемы // Нефтегазовая геология, теория и практика, 2007, № 2, с. 1—32.

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.

Маргулис Л.С. Секвенсная стратиграфия в изучении осадочных чехлов // Нефтегазовая геология, теория и практика, 2008, № 3, с. 1—26.

Салин Ю.С. Конструктивная стратиграфия. М., Наука, 1979, 173 с.

Сейсмическая стратиграфия. Использование при поисках и разведке нефти и газа / Ред. Ч. Пейтон. М., Мир, 1982, 846 с.

Чечулин В.Л. Об оценке масштаба (дисперсии) выборки, не использующей оценку положения (среднего). Пермь, Изд-во Перм. ун-та, 2011, 4 с.

Dorigo M. Optimization, learning and natural algorithm. Milano, Politecnico di Milano, 1992, 140 p.

Haites T.B. Perspective correlation // AAPG, 1963, v. 47, № 4, p. 553—574.

Lee C.Y. An algorithm for path connections and its applications // 1961, IRE Transactions on Electronic Computers EC-10, 1961, v. 2, p. 346—365.

Lineman D.J., Mendelson J.D., Toksos M.N. Well to well log correlation using knowledge-based systems and dynamic depth warping // SPWLA 28th Annual Logging Symposium «High-impact palynology in petroleum geology: applications from Venezuela (Northern South America)» (June 29-July 2, 1987). AAPG Bull., 1987, v. 86, p. 421—453.

Mirowski P., Herron M., Seleznev N., Fluckiger S., McCormick D. New software for well-to-well correlation of spectroscopy logs. 2005, 6 p. http://cs.nyu.edu/~mirowski/pub/AAPG_2005_NewSoftwareForWell2WellCorrelation.pdf.