

СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СКВАЖИННЫХ И СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПРИ СОЗДАНИИ СКОРОСТНОЙ МОДЕЛИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ В ПАКЕТАХ TESSERAL-2D И TESSERAL PRO

А.В. Коломиец

Институт кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины,
03178, проспект Академика Глушкова, 40.
Тел.: (044) 526 3603, pgt@ukr.net

Разработана методика построения геологических моделей при совместном использовании данных каротажных измерений в скважинах и данных сейсмических исследований на местности для уточнения положения пластов в межскважинном пространстве. Методика реализована в составе геолого-информационных пакетов Tessleral-2D и Tessleral Pro. Приведен пример применения методики для построения модели профиля на Белоусовской площади (северо-западная часть Днепровско–Донецкой впадины).

A method for geological model building has been developed which uses combination of well-log data and seismic exploration data for refining the geometry of geological strata in the mid-well space. The method is implemented in the geological information packages "Tessleral-2D" and "Tessleral Pro". An application of the method is illustrated for the data from the profile on Bilousivska field (North-West part of the Dnieper – Donetsk Depression).

Введение

Создание геологической модели месторождения является одной из самых важных задач при оценке запасов полезных ископаемых и анализе целесообразности дальнейших геологоразведочных работ на местности.

Геологическая модель является упрощенным представлением реального разреза Земли, в которое включены только те элементы, которые, как считается, оказывают наиболее значительное воздействие на измерения. При формировании модели принимают во внимание многие факторы. Поэтому степень изученности геологического разреза и достоверность сведений о параметрах среды имеет решающее значение для полноты результата моделирования [1]. Корректное и правильное построение геологической модели зависит от полноты использования всех имеющихся геолого-геофизических и геолого-промысловых данных, а также от наличия программно-алгоритмического обеспечения, позволяющего автоматизировать трудоемкие и громоздкие вычислительные процессы обработки разнородной информации.

Источниками геологической информации, используемой для построения модели, являются: данные структурной интерпретации сейсморазведки; данные бурения в виде описания кернов, шламов и т.п.; данные геофизических исследований скважин (ГИС) в виде измерений электрических, радиометрических, магнитных, акустических механических и других свойств разреза [2]. Сейсмические данные дают представление о глубинах, геометрическом строении, протяженности, углах падения сейсмических горизонтов, а также распределении скоростей прохождения волн в разрезе. Данные о литологическом строении поступают из исследования скважин, расположенных на этом профиле. Таким образом, общая картина, полученная из сейсмических данных, дополняется более детальными измерениями, полученными методами каротажа глубоких скважин.

Как правило, геологические профили или разрезы составляются по материалам геофизических исследований в скважинах, которые дают наиболее достоверную информацию о строении месторождения, глубине залегания залежей углеводородов, характере их насыщенности, положении флюидоразделяющих контактов. Выделенные реперы в разрезе скважин, продуктивные одноименные горизонты или пласты трассируются от одной скважины к другой по линии выделенных профилей. Однако, обладая наиболее точными данными в точках расположения скважин, межскважинное пространство определяется довольно условно и не всегда соответствует действительности. Помочь в этом может привлечение сейсмолитологии – метода стратиграфического расчленения и площадного картирования геологического разреза. Сейсмолитология как самостоятельный раздел геологии, изучающий породно-слоевые ассоциации, выделяет тела, целостные во времени и отвечающие седиментационным циклам (циклиты) [3, 4]. Именно комплексирование материалов ГИС и сейсморазведки для выделения и корреляции цикллитов и породно-слоевых ассоциаций позволяет наиболее достоверно воссоздать целостную геологическую модель месторождения. А это в дальнейшем будет использовано при заложении новых буровых скважин на площади, установлении гидродинамических особенностей продуктивных горизонтов, возможном проектировании горизонтального бурения по пласту и т. д. Комплексное использование методов ГИС и сейсморазведки для прогнозирования геологического разреза применялось и ранее. Как правило, при решении этой задачи выполнялась трансформация обычных представлений ГИС либо в структурные отображения, удобные для

рассмотрения их совместно с данными сейсморазведки, либо одновременная трансформация методов каротажа и сейсморазведки для системно-литмологического анализа породно-слоевых ассоциаций, установления генезиса отложений, корреляции продуктивных горизонтов и т. д. [5]. Однако методы ГИС, учитывая их высокую разрешающую способность по дифференциации геологического разреза в комплексе с методами сейсморазведки, могут занимать свое особое место при структурно-формационной интерпретации.

Наиболее корректно задача построения геологического профиля разведываемой площади может быть решена путем совместной интерпретации материалов каротажа и сейсморазведки, т. е. использовать непосредственное прослеживание между скважинами геологических границ, отождествляемых с сейсмическими отражающими горизонтами и выполнять анализ сейсмической волновой картины. Построение литостратиграфической схемы, являющейся основой структурных построений, палеоструктурных и литолого-фациальных реконструкций исследуемого объекта в значительной степени зависит от достоверности литмологического расчленения разреза скважин, стратиграфической разбивки и корреляции.

В данной работе предложена методика построения геологических моделей по данным каротажных измерений в скважинах, реализованная в пакетах полноволнового моделирования Tesserall-2D и Tesserall Pro, разрабатываемых по заказу канадской компании Tesserall Technologies Inc [6].

Полноволновое сейсмическое моделирование, положенное в основу пакета Tesserall-2D, долгое время не применялось широко в практике геофизических исследований из-за нехватки вычислительной мощности и информационных ресурсов компьютерной техники. Использовались менее точные способы моделирования – лучевой или конечно-разностный, основанный на решении скалярного волнового уравнения. Благодаря разработке оптимизированных алгоритмов, пакет Tesserall-2D в настоящее время способен работать даже на персональном компьютере в среде Microsoft Windows, и при этом позволяет достаточно быстро и с хорошей точностью моделировать процессы распространения сейсмических и акустических волн в неоднородных сложнопостроенных средах [7].

Важное преимущество данного пакета перед другими, в частности реализующими лучевой способ расчета волнового поля, заключается в том, что для моделирования сложных сейсмических эффектов: интерференционных, сложноотраженных волн от субвертикальных границ, псевдоанизотропии и т. п., нет необходимости в использовании специальных программных продуктов. С помощью данного пакета могут быть смоделированы практически все сейсмические эффекты, характерные для упругой модели среды.

Благодаря распространению пакета Tesserall, полноволновое моделирование начинает широко применяться в различных областях сейсмогеологических исследований. Получаемые волновые поля используются при геолого-геофизической интерпретации сейсмических данных, при проектировании параметров полевых сейсмических наблюдений на конкретных объектах, при исследовании сейсмических эффектов для разнообразных моделей сред, как эффективный инструмент для учебных целей и др.

Предложенный в работе метод построения модели включает использование данных сейсморазведки, представляющих собой решетки значений продольных и поперечных скоростей и плотностей в плоскости разреза, а также данные каротажных кривых в виде массива значений, ориентированного в плоскости разреза по вертикали в районе пробуренной скважины. В случае интерпретации волнового поля, рассмотренном в данной работе, самыми информативными являются данные акустического каротажа (АК), представляющие собой измеренные непосредственно в среде скорости упругих колебаний, — важнейший параметр волнового поля. При этом решетка сейсмических данных служит основой для построения реперных линий, определяющих поведение пластов в межскважинном пространстве.

Рассмотрим более подробно методику получения модели распределения скоростей и плотностей в плоскости разреза, реализованную в геолого-информационном пакете Tesserall-2D. Эта методика получила дальнейшее развитие в новой версии пакета Tesserall Pro.

Пусть скважинные данные загружены в разрез вдоль заданного профиля. Теперь перенумеруем скважины в порядке их загрузки. Предполагаем, что данные представлены в виде массивов детерминированных значений, полученных в результате измерений в скважинах.

Для восстановления карты распределения скоростей в разрезе вдоль геологического профиля необходимо сопоставить значения каротажных кривых в соседних скважинах и построить вспомогательные линии, называемые реперами. Эти линии задают направление изменения скоростей прохождения упругих волн в межскважинном пространстве и используются как дополнительные данные при построении скоростного разреза.

Автоматическое построение реперов основано на нахождении максимально коррелированных участков кривых, представляющих собой скважинные данные. Таким образом, для каждого отрезка вдоль оси глубин и для каждой каротажной кривой решаем оптимизационную задачу для нахождения фрагментов кривых, корреляция между которыми максимальна. Найденные фрагменты затем соединяются отрезком прямой.

Модуль построения моделей пакета Tesserall-2D позволяет редактировать полученные автоматически линии корреляции вручную. Кроме того, допускается создание криволинейных линий в виде ломаных с любым количеством вершин. Для правки реперов в программе предусмотрен полный набор средств для работы с векторными линиями: перемещение линий и вершин, создание, удаление линий и вершин, вставка новых вершин. Криволинейные реперы обычно создаются на основе привлечения дополнительных данных, например данных сейсморазведки на местности, и обеспечивают повышение точности построения результирующей модели. На рис. 1 показано окно строителя моделей Tesserall-2D с загруженными скважинами и

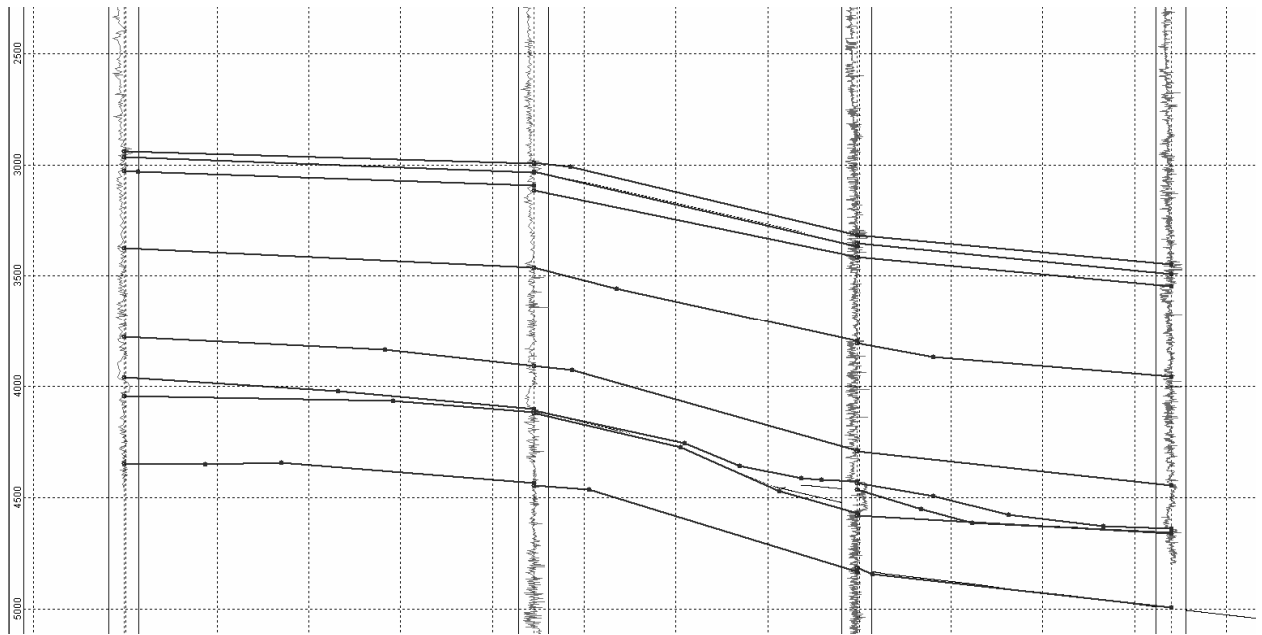


Рис. 1. Скважины и реперные линии в окне построителя моделей пакета Tesselal-2D

построенными реперами. Сразу же оговоримся, что взаимно пересекающиеся реперные линии лишены физического смысла и потому не используются. Возможно лишь слияние двух и более линий в случае выклинивания геологических горизонтов.

Применение интерполяции позволяет построить карту распределения скоростей на всей плоскости разреза. Рассмотрим подробнее алгоритм этого построения.

Пусть для каждой пары последовательных скважин P_i, P_{i+1} построено m_i реперных линий, каждая из которых описывается функцией $h = \lambda_j(x)$, $j = 1, \dots, m_i$. Разобьем плоскость построения модели сеткой ортогональных прямых. Будем считать поле скоростей определенным, когда найдены значения скорости распространения волн в каждом узле введенного разбиения. Остальные значения могут быть получены методом интерполяции с любой наперед заданной точностью, зависящей от шага разбиения плоскости.

Теперь определим скорость в узловой точке $M_{qr}(X_q, h_r)$, находящейся между скважинами P_i и P_{i+1} по горизонтали и покрываемой данными каротажных исследований в обеих скважинах по вертикали. Узловые значения, выходящие за пределы глубин, покрываемых каротажными данными, требуют специальной обработки, зачастую вручную с привлечением дополнительных геолого-геофизических данных о разрезе.

Пусть H_q — множество глубин пересечения реперных линий с вертикалью $x = X_q$. Будем рассматривать ситуацию, когда реперные линии существуют как выше точки M_{qr} , так и ниже ее. В противном случае требуется специальная обработка, о которой будет сказано далее. В общем случае точка M_{qr} не лежит на реперной линии (в противном случае решение упрощается и здесь не представлено).

Построим усредненную реперную линию, проходящую через точку $M_{qr}(X_q, h_r)$. Фактически нас интересуют лишь координаты точек пересечения этой линии со скважинами P_i и P_{i+1} . Обозначим горизонтальные координаты этих точек H_i и H_{i+1} соответственно и из соображений пропорциональности получим следующее соотношение:

$$H_i = \frac{\lambda_{top}(x_i)(h_r - \lambda_{bot}(X_q)) - \lambda_{bot}(x_i)(h_r - \lambda_{top}(X_q))}{\lambda_{top}(X_q) - \lambda_{bot}(X_q)},$$

$$H_{i+1} = \frac{\lambda_{top}(x_{i+1})(h_r - \lambda_{bot}(X_q)) - \lambda_{bot}(x_{i+1})(h_r - \lambda_{top}(X_q))}{\lambda_{top}(X_q) - \lambda_{bot}(X_q)},$$

где $\lambda_{top}(x)$ — ближайшая реперная линия, лежащая выше точки $M_{qr}(X_q, h_r)$; $\lambda_{bot}(x)$ — ближайшая реперная линия, лежащая ниже точки $M_{qr}(X_q, h_r)$.

В случае когда точка $M_{qr}(x_q, h_r)$ лежит выше или ниже всех реперных линий, строим вспомогательную реперную линию выше или ниже $M_{qr}(x_q, h_r)$, параллельную ближайшей существующей линии.

Теперь можем непосредственно определить значения скоростей $V_i = v(H_i)$ и $V_{i+1} = v(H_{i+1})$ в скважинах P_i и P_{i+1} в вертикальных точках H_i и H_{i+1} на основе загруженных каротажных данных. Скорости в точках размещения скважин определяются исходя из правил преобразования скоростей в скважинах.

Искомая скорость v_{qr} в узле $M_{qr}(X_q, h_r)$ решетки скоростей определяется формулой

$$v_{qr} = V_i + \frac{X_q - x_i}{x_{i+1} - x_i} (V_{i+1} - V_i). \quad (1)$$

Это определение корректно ввиду следующих соображений. Существование и единственность для любой фиксированной сетки следуют из конструктивного алгоритма построения. Кроме того, значения скорости в каждой точке плоскости не зависят от выбора сетки, а лишь от плоскостных координат точки. Анализ формулы (1) показывает непрерывность скорости как функции плоскостных координат. Поэтому такое определение скорости корректно.

Описанный алгоритм реализован в пакете Tesseral-2D и дополнен пользовательским интерфейсом, позволяющим править полученное поле скоростей вручную, а также дополнять его в областях, не покрытых значениями каротажных кривых в скважинах.

На рис. 2 представлена модель профиля на Белоусовской площади (в северо-западной части Днепровско-Донецкой Впадины), построенная на базе сейсмического профиля 6 7 78 с учетом только реперных границ, выделенных на акустических кривых каротажных измерений в скважинах. На нем мы видим несколько основных пачек пород с определенной скоростью и определенного литологического состава. Эти данные определены на основании данных сейсмической разведки площади, что является обычной практикой построения моделей геологических разрезов.

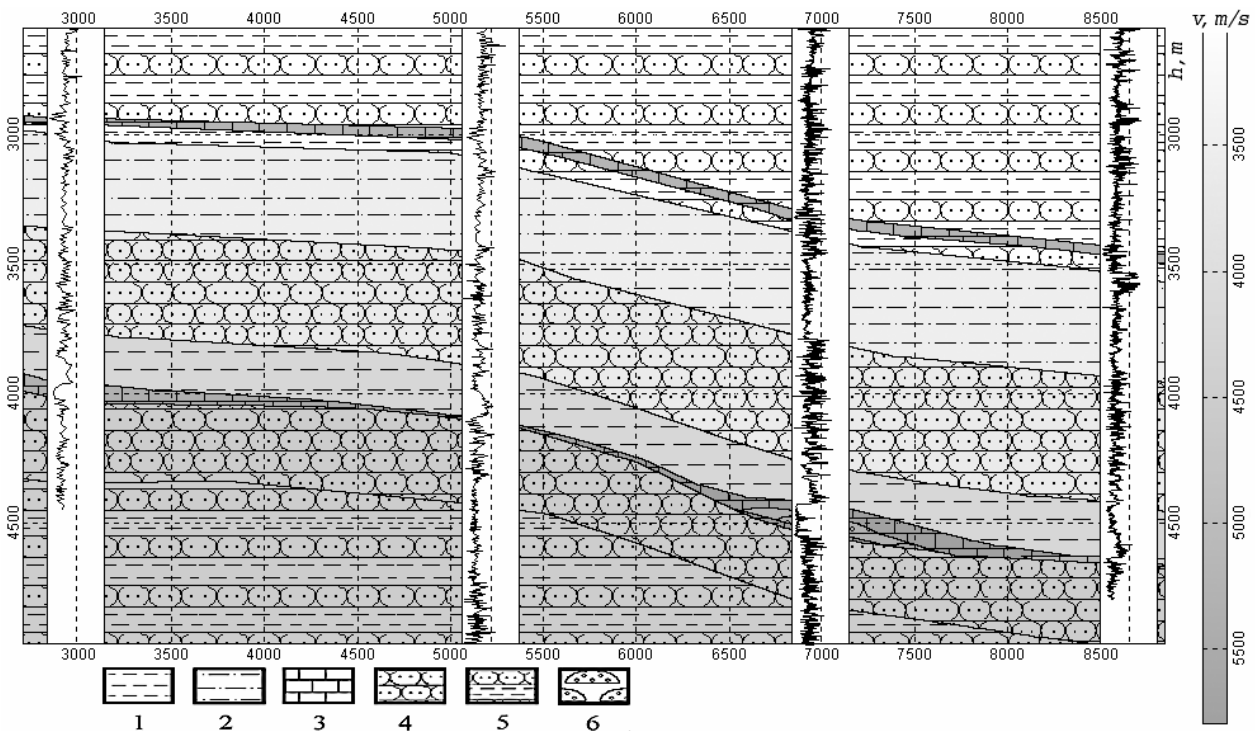


Рис. 2. Модель профиля, построенная вручную по данным сейморазведки

Литологический состав: 1 – аргиллиты; 2 – алевролиты; 3 – известняки; 4 – песчаники; 5 – чередование песчаников и глин; 6 – газовая залежь.

В рамках каждой пачки в модели, изображенной на рис. 2, используется осредненное значение скорости, так как методика построения модели вручную не позволяет дифференцировать тонкие слои пород с различной скоростью в пределах пачки из-за громоздкости процедуры и сложности ее представления в цифровом виде. Это будет сделано с помощью вышеописанной методики с применением данных каротажных кривых. Результаты построения модели по этому геологическому профилю, полученной с применением данной методики, показаны на рис. 3. Жирными линиями нанесены реперы.

Здесь использованы диаграммы АК, проинтерпретированные с использованием данных стандартного и радиометрического каротажа. На базе сейсмического профиля и 4-х буровых скважин создана обобщенная

модель строения карбонатных образований визейского возраста в зоне их промышленной нефтегазоносности. В средней части профиля наблюдается линзовидное тело (Беличевское биогермное сооружение), которое содержит газовую залежь.

Вышеописанная методика использования скважинных данных позволяет улучшить качество моделирования геологического разреза и получать более достоверные результаты при решении прямой геологической задачи. Как видим, дифференциация разреза заметно увеличилась. Поскольку точность скважинных измерений на порядок выше точности данных сейсмических исследований, привлечение данных каротажа позволяет моделировать маломощные пропластки, толщина которых гораздо меньше длины волны, применяемой при сейсмическом моделировании. При этом геометрическое расположение пропластков в плоскости разреза уточняется благодаря оригинальной методике построения реперных линий и использования их при расчете поля скоростей. Этот способ, в сочетании с возможностью правки реперных линий вручную, позволяет получать высококачественную модель без использования сложных вспомогательных построений, описанных в [8].

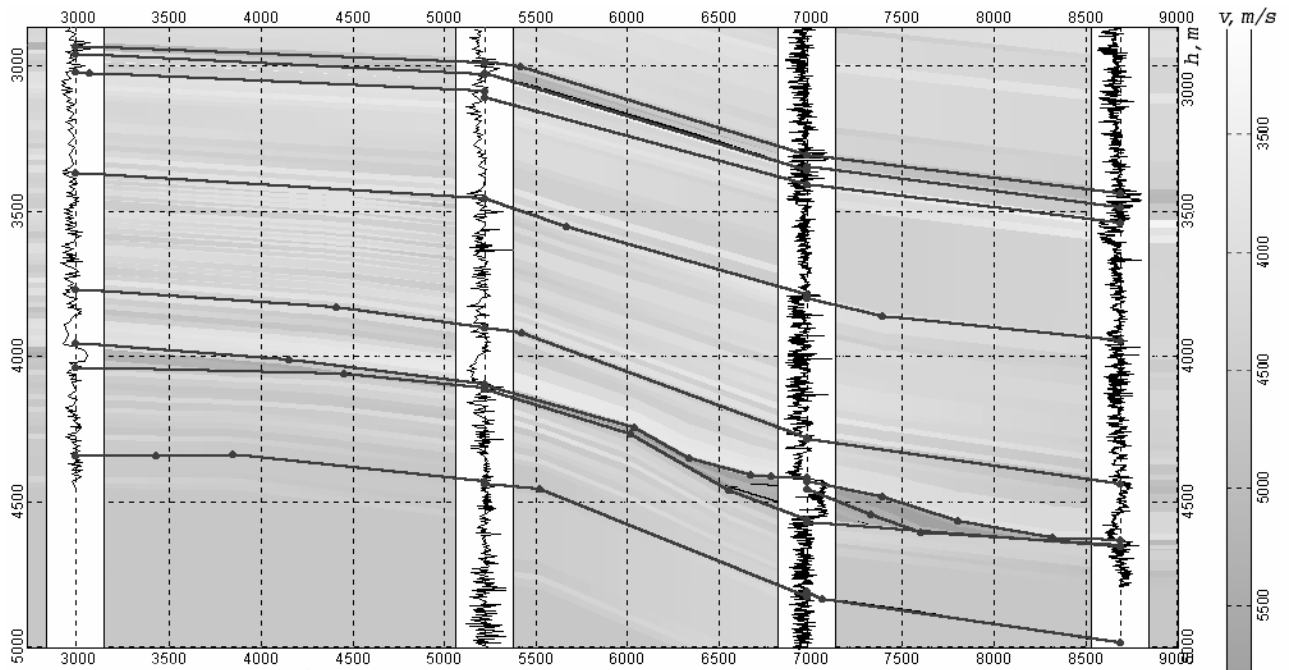


Рис. 3. Модель профиля, рассчитанная автоматически с использованием данных каротажа

Результатом дальнейшего развития пакета Tesseral-2-D явился пакет Tesseral Pro, позволяющий строить скоростные модели с привлечением данных измерений в скважинах, карт геологических поверхностей, сейсмических двумерных моделей и других данных. Tesseral Pro позволяет строить трехмерные карты стратиграфических горизонтов на основе данных каротажных исследований скважин, строить параметрические разрезы и интегрировать их с данными сейсмических исследований для уточнения параметров скоростной модели.

В дополнение к скоростям P- и S-волн и плотностям также поддерживаются параметры анизотропии и трещиноватости. Все параметры могут как задаваться вручную, так и рассчитываться на основе сейсмического разреза, каротажных кривых или заданных пользователем базовых точек. Программа Tesseral Pro позволяет создавать глубинные скоростные модели по скважинным данным; картам геологических поверхностей; сейсмическим 2D, 3D-моделям.

В Tesseral Pro реализована возможность построения модели по картам поверхностей кровель, подошв пластов. Модель строится автоматически [9] как вертикальный разрез по всем рассчитанным (загруженным) поверхностям. Построение карты горизонтов производится в специальном окне, называемом полем карты. На рис. 4 представлен пример карты, рассчитанной в автоматическом режиме по скважинным данным.

Построение модели геологического разреза в пакете Tesseral Pro производится в специальном окне, называемом полем модели. Поддерживаются ручное создание полигонов и формирование полигонов по картам поверхностей пластов. Параметры полигонов (скорости, плотность, анизотропия, трещиноватость) устанавливаются в диалоге для всего полигона, но могут также рассчитываться по сейсмограммам, каротажным кривым или по базовым точкам.

Для создания модели по скважинам в базу данных предварительно загружаются координаты скважин, инклинометрия (а если она отсутствует то, для субвертикальных скважин используется только альтитуда), глубины пластопересечений, акустический каротаж, применяемый для построения тонкослойной модели. На

рис. 5 показан пример пласта, полученный путем проведения профиля в поле карты после построения поверхностей геологических горизонтов. Для наглядности на рис. 5 показан пример только одного пласта.

В настоящее время пакет Tesseract Pro активно развивается.

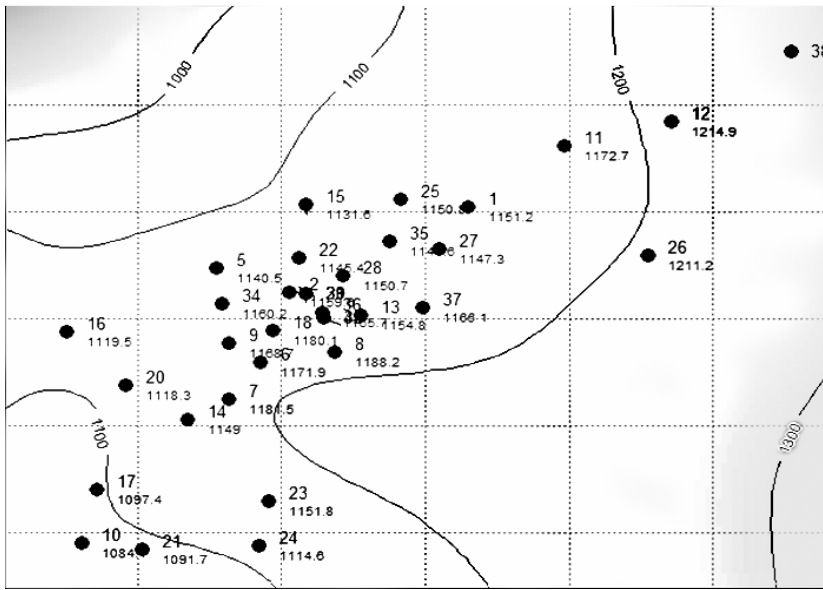


Рис. 4. Карта геологического горизонта, рассчитанная в пакете Tesseract Pro по скважинным данным

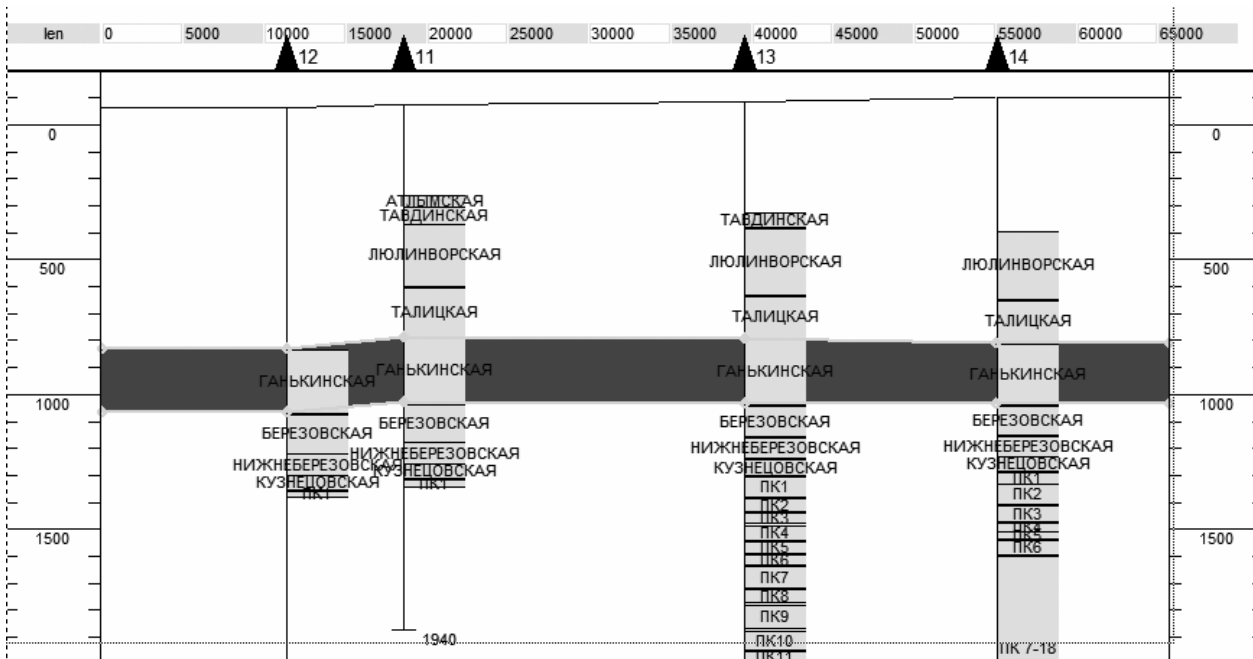


Рис. 5. Пласт, построенный в пакете Tesseract Pro по данным каротажа

1. Гогоненков Г.Н. Изучение детального строения осадочных толщ сейсморазведкой. – М.: Недра, 1987. – 221 с.
2. Дахнов В.Н. Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. – М.: Недра, 1982. – 448 с.
3. Геологический словарь. В 2 т. – М.: Недра, 1973. Т.1, 1975. – Т.2..
4. Карогодин Ю.Н. Практическое значение теоретических и методологических разработок седиментационной цикличности при поисково-разведочных работах на нефть и газ // Прикладные вопросы седиментационной цикличности и нефтегазоносности. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1987. – С. 5–10.
5. Таратын Э.А., Мушин И.А., Ермакова Л.И., Храпова Е.И. Выделение и ранжирование циклитов при структурно-формационной интерпретации ГИС // Литмологические закономерности размещения резервуаров и залежей углеводородов. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1990. – С. 123–130.
6. www.tesseract-geo.com.
7. Коломиец А.В., Коломиец Е.В. Использование скважинных данных при создании скоростной модели геологической среды в пакете Tesseract-2D. // Компьютерная математика. – 2003. – № 1. – С. 98–108.
8. Красножон М.Д., Косаченко В.Д., Коломиец О.В. Разработка и внедрения программного пакета побудови геологічних моделей нафтогазових покладів // Геофизический журнал. – 2001. – 23, № 4. – С. 55–60.
9. Тульчинский В.Г. Технология картопостроения // Кибернетика и системный анализ. – 1999. – № 3. – С. 17 – 21.