

УДК 004.021

**ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
РЕМАСШТАБИРОВАНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ  
МОДЕЛЕЙ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Ю.А. Сивов, С.В. Ефимов

Томский политехнический университет

E-mail: sivov.yu@gmail.com

**Сивов Юрий Александрович**, студент кафедры автоматизации и компьютерных систем Института кибернетики ТПУ.  
E-mail: sivov.yu@gmail.com  
Область научных интересов: фильтрационное моделирование, методики фильтрационного моделирования, автоматизация этапов фильтрационного моделирования.

**Ефимов Семен Викторович**, канд. техн. наук, ассистент кафедры автоматизации и компьютерных систем Института кибернетики ТПУ.

E-mail: efimon@tpu.ru  
Область научных интересов: анализ и синтез систем автоматического управления с интервально-заданными параметрами.

Статья посвящена созданию программы, реализующей процедуру ремасштабирования моделей месторождений нефти и газа по определенному алгоритму. В первой части статьи дается краткая информация о необходимости использования процедуры апскейлинга при гидродинамическом моделировании, а также описание алгоритма процедуры апскейлинга. Во второй части представлен пользовательский интерфейс разработанного приложения и анализ результатов его работы на основе сравнения срезов исходной и ремасштабированной моделей месторождений в программном комплексе Petrel.

**Ключевые слова:**

3D грид, геологическая модель, фильтрационная модель, апскейлинг, геолого-статистический разрез, проницаемость, пористость.

Используя современные инструменты геологического моделирования, инженеры и геологи на основе сбора, обобщения и обработки геолого-промысловых данных могут создавать подробные, трехмерные геологические модели месторождений, состоящие из множества ячеек с заложенными в них различными свойствами, такими как проницаемость, пористость ячейки и т. п.

Размеры моделей варьируются от сотен тысяч до нескольких миллионов ячеек и не могут быть использованы для моделирования коллектора – породы, допускающей свободное перемещение нефти, по причине больших временных и компьютерно-ресурсных затрат при обработке таких объемов данных [1]. Для уменьшения количества ячеек модели к ней применяется процедура апскейлинга, которая объединяет соседние слои модели на основании схожести свойств в ячейках слоев. Результатом проведения апскейлинга является фильтрационная модель в первом приближении, в которой осреднены параметры геологической модели с сохранением структуры и запасов в пространстве как в изначальной модели [2].

Геологические модели месторождений создаются для различных целей, но общим является желание получения представления о недрах. В зависимости от цели могут быть важны различные аспекты модели.

В случае построения модели, при региональной разведке, наиболее важными могут считаться формы геологических структур. Геологические модели могут использоваться для точного расчета объемов или имитации влияния различных режимов отложения на полученные данные. Размер и сложность месторождений могут играть ограничивающую роль при получении моделей, которые наибольшим образом соответствуют истории.

Одним из наиболее известных программных продуктов, используемых для построения моделей, является Petrel компании Schlumberger. Этот программный комплекс позволяет строить и обновлять модели месторождений. Для моделирования в Petrel применяются 3D гриды, состоящие из множества ячеек, с помощью которых пользователь может перестраивать модели реальной среды.

3D-грид делит модель месторождения на ячейки. Каждая из ячеек состоит из одного типа пород и характеризуется некоторым перечнем свойств, таких как значение пористости, проницаемости и т. д. (рис. 1). Такой подход позволяет создавать модели среды, которые могут быть использованы для подсчета запасов нефти и последующей разработки месторождения.

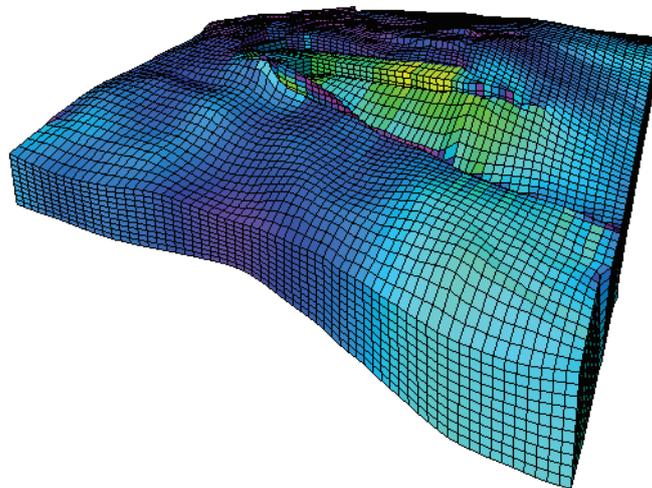


Рис. 1. 3D-грид модели месторождения

Разрешение сетки является ключевым фактором при построении модели. Высокое разрешение сетки (большое число ячеек) позволит пользователю создавать детальные модели среды, однако для расчетов на таких громоздких моделях требуется большое количество времени. Низкое разрешение не позволит создавать детальные модели, но оно позволяет пользователю проводить быстрые расчеты. В общем случае разрешение зависит от цели моделирования, детальности и количества имеющихся данных [3].

Гидродинамическое моделирование – это изучение движения флюидов в углеводородном пласте при условиях эксплуатации скважин. Целью такого моделирования является прогнозирование поведения продуктивного пласта при различных вариантах добычи или улучшение понимания его геологических свойств с помощью сравнения известного поведения с результатами моделирования при использовании различных геологических представлений [4].

Многие гидродинамические симуляторы не могут справиться с размерами сетки, созданной при построении геологической модели. Геологические модели содержат обычно от 0,5 до 1 миллиона ячеек, в то время как для выполнения гидродинамического моделирования за приемлемый промежуток времени на одном процессоре средний симулятор требует модель, состоящую менее чем из  $10^5$  ячеек.

Данные факты дают обоснование необходимости процедуры апскейлинга, применяемой к геологическим моделям (рис. 2). Несомненно, более грубая модель потеряет детальность геологической сетки, но цель состоит в том, чтобы иметь представительную модель для задач гидродинамического моделирования [5].

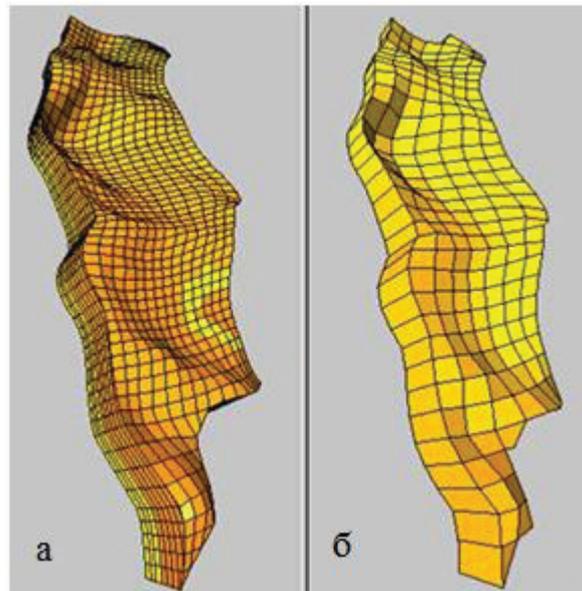
По причине значительных временных затрат, при проведении апскейлинга вручную, возникла необходимость создания собственного независимого программного модуля, реализующего процедуру апскейлинга геологических моделей месторождений по определенному алгоритму.

В основу алгоритма апскейлинга положена методика, в которой выбор слоев для объединения основан на параметре  $P$  – скорости движения водных масс в пласте [6]:

$$P = K_{np} / K_n,$$

где  $K_{np}$  – коэффициент проницаемости,  $K_n$  – коэффициент пористости ячейки.

В работе алгоритма используются такие величины, как сохраняемая неоднородность ( $B$ ) – это величина сохраняемой в фильтрационной модели неоднородности геологической модели, и теряемая неоднородность ( $W$ ) – это величина неоднородности, удаляемая из модели при объединении слоев.



**Рис. 2.** Сетка: а) геологическая; б) ремасштабированная

Соответственно, до начала процедуры апскейлинга  $W = 0$ , а  $B$  равно полной неоднородности геологической модели и вычисляется по формуле:

$$B = \sum_{i,j,k=1}^{NX,NY,NZ} n_{i,j,k} \cdot (P_{i,j,k}^C - \bar{P}_{i,j})^2,$$

где  $n_{i,j,k}$  – геометрический объем ячейки модели, а  $\bar{P}_{i,j}$  – взвешенное по объему ячейки среднее параметра  $P$  в каждом столбце модели.

Другими словами, заменяя 3D модель с параметрами  $P_{i,j,k}$  ее двумерным отображением с параметрами  $\bar{P}_{i,j}$ , можно проследить насколько текущее значение  $P_{i,j}$  каждой ячейки отличается от того же значения в двумерной сетке. Приведение геологической модели к двумерной сетке – это конечная точка процедуры апскейлинга.

Оптимальными для объединения слоями считаются слои, дающие минимальное значение теряемой неоднородности, рассчитываемое по формуле:

$$W = W_a + W_b + \left( \frac{n_a \cdot n_b}{n_a + n_b} \right) \cdot (P_a^C - P_b^C)^2,$$

где  $W_a$ ,  $W_b$  – неоднородности внутри объединяемых ячеек  $a$  и  $b$ , полученные после предыдущих объединений, а  $P^C$  – промежуточное значение параметра  $P$ . При объединении слоев геометрический объем и параметр  $P^C$  каждой ячейки объединенного слоя пересчитываются по формулам:

$$n = n_a + n_b;$$

$$P^C = \frac{(n_a \cdot P_a^C + n_b \cdot P_b^C)}{(n_a + n_b)}.$$

При этом неоднородность между блоками уменьшается на величину:

$$\delta B = - \left( \frac{n_a \cdot n_b}{n_a + n_b} \right) \cdot (P_a^C - P_b^C)^2.$$

После окончания процедуры апскейлинга  $B = 0$ , а  $W$  равна первоначальной неоднородности модели.

Данный алгоритм реализован автором статьи в разработанном на языке C++ программном модуле «ScaleUp».

Приложение принимает на вход данные геологической модели и после проведения процедуры апскейлинга возвращает ремасштабированные данные и осредненные свойства этой модели. Данные моделей представляют собой текстовые файлы, с ключевыми словами-метками и числовыми значениями.

Также существует возможность до начала процедуры апскейлинга в соответствующем поле ввода указать номера слоев-неколлекторов модели – слоев, через которые невозможен переток жидкости по причине малого размера пор в этих породах. Данные слои будут объединяться с другими в последнюю очередь.

По окончании процедуры апскейлинга в главном окне приложения будет выведен результат работы алгоритма апскейлинга, представляющий собой зависимость сохраняемой неоднородности модели от количества слоев, представленный в виде графика кривой. За 100 % принимается неоднородность загруженной геологической модели (рис. 3).

Если при загрузке входных данных были указаны слои-неколлекторы, весь пласт модели разбивается на пласты, ограниченные неколлекторами, и для каждого из пластов строится отдельный график, переход между которыми осуществляется с помощью стрелок в нижней части окна приложения.

На данном этапе пользователь имеет возможность, выбрав любую из точек графика, пронаблюдать очередность объединения слоев для выбранной точки в текстовом поле справа и решить, какое количество слоев необходимо оставить в фильтрационной модели.

Для упрощения данного выбора через график кривой проведена диагональная линия, делящая график на область корректного апскейлинга, расположенную выше линии – область, где сохраняется достаточное значение неоднородности коллектора согласно геологической модели, и область некорректного апскейлинга ниже диагональной линии – область, где это значение не сохраняется.

Помимо выгрузки ремасштабированных данных есть возможность построения геологостатистического разреза (ГСР) каждого из загруженных в приложение свойств модели. ГСР показывает среднее по слою значение свойства модели. Построение на одном графике ГСР геологической и фильтрационной моделей позволяет оценить корректность выбора слоев для объединения. ГСР свойств строятся на второй вкладке программного модуля «ScaleUp» (рис. 4). Переход между ГСР для каждого из свойств осуществляется с помощью переключателей, расположенных слева.

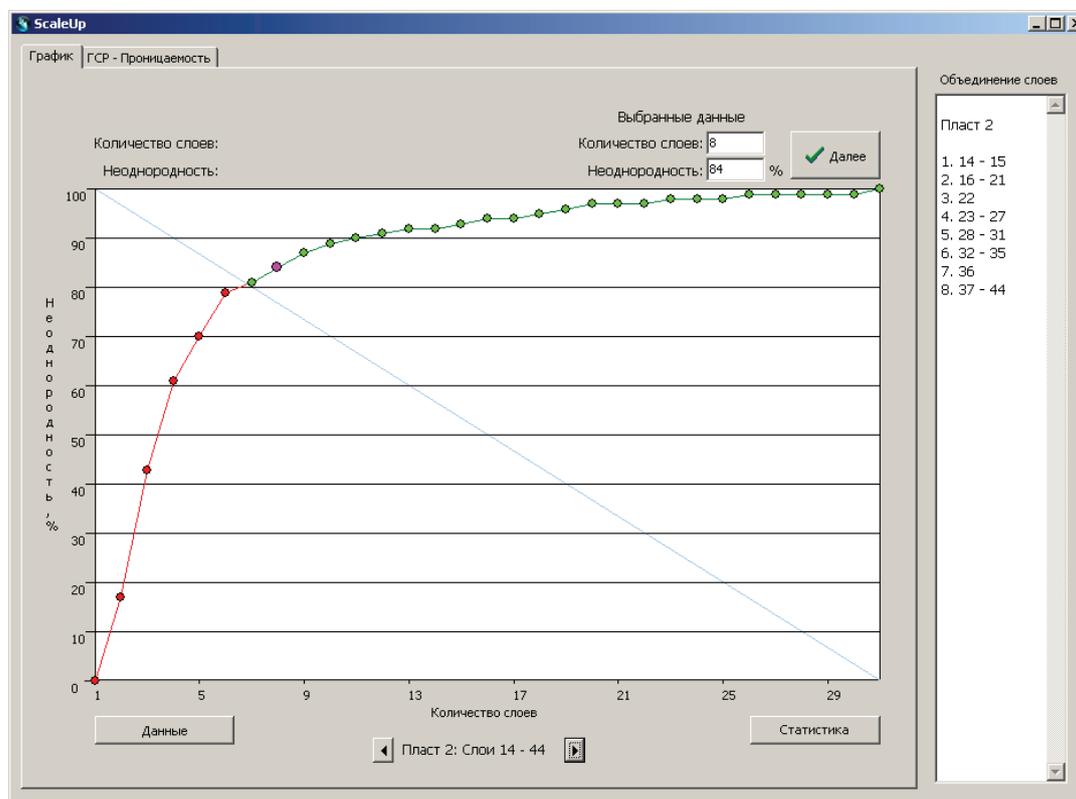


Рис. 3. График зависимости сохраняемой неоднородности модели от количества слоев с выбранной точкой

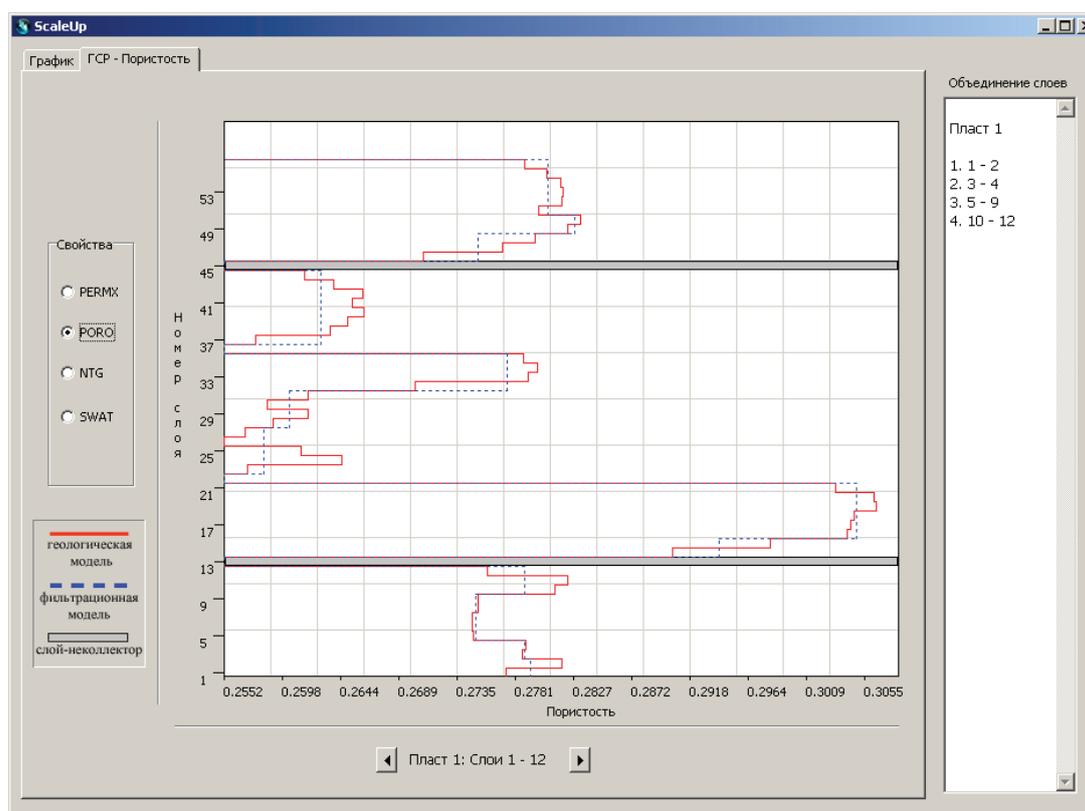


Рис. 4. ГСР пористости геологической и фильтрационной моделей

Проведем сравнение геологической модели месторождения и фильтрационной, полученной с помощью приложения «ScaleUp». Для этого используем программный комплекс Petrel, загрузив в него обе модели месторождений и сравним срезы этих моделей (рис. 5).

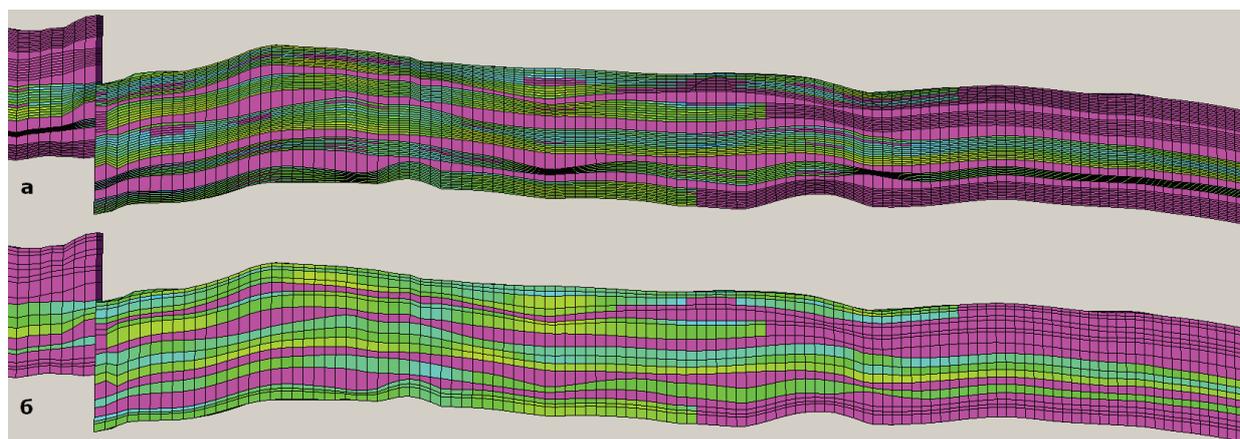


Рис. 5. Срез модели по проницаемости: а) геологическая модель; б) фильтрационная модель

Как видно, по сравнению с геологической моделью фильтрационная модель состоит из меньшего количества слоев и в объединенных слоях содержит осредненные значения свойств геологической модели (цвет ячейки характеризует числовое значение хранимого в ней свойства).

Альтернативой методики апскейлинга, представленной выше, является однородный апскейлинг, при использовании которого объединяются каждые несколько слоев модели (их количество выбирается пользователем). Данный способ при своей простоте исполнения не имеет

под собой теоретического обоснования, а также в нем не используется ни один из способов анализа модели на предмет выбора схожих по свойствам слоев для объединения.

Также существует плагин «Upgridding» для программного комплекса Petrel, реализующий апскейлинг на основе среднего по слою взвешенного по объему значения свойства модели, выбранного пользователем. Слои в модели объединяются на основе близости этих осредненных значений свойства (рис. 6). Такой способ апскейлинга вместо анализа данных по всей 3D модели предлагает сравнивать набор средневзвешенных по слоям значений, и подобным образом невозможно учесть вариативность распространения коллектора и неколлектора по ячейкам модели. На рис. 7 приведен срез модели по песчаности (желтым цветом обозначено ненулевое значение, белым – нулевое). Несмотря на различное распределение песчаности по каждому из слоев модели, ее средневзвешенное значение в каждом слое будет одинаковым в силу равного количества ячеек с ненулевым значением, что приведет к некорректности определения слоев для объединения, схожих по коллекторным свойствам.

Данная вариативность распространения коллектора и неколлектора учтена в программном модуле «Scale Up» согласно вышеупомянутому алгоритму апскейлинга модели.

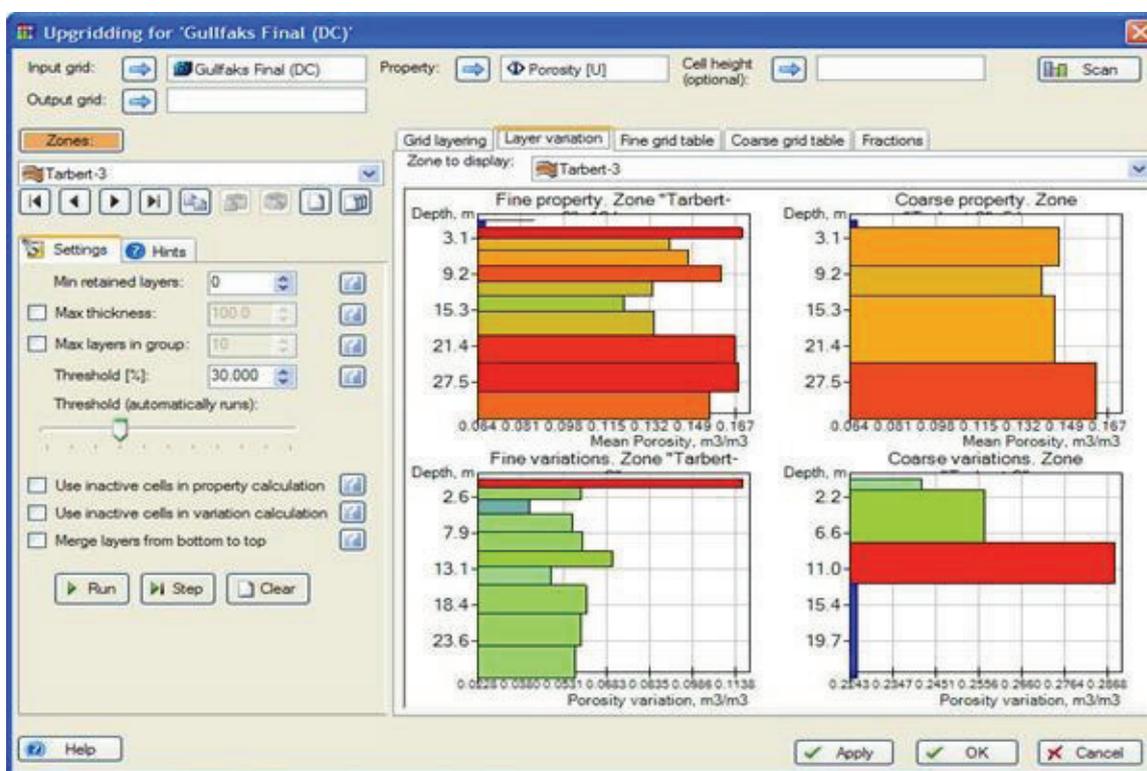


Рис. 6. Пользовательский интерфейс плагина «Upgridding»

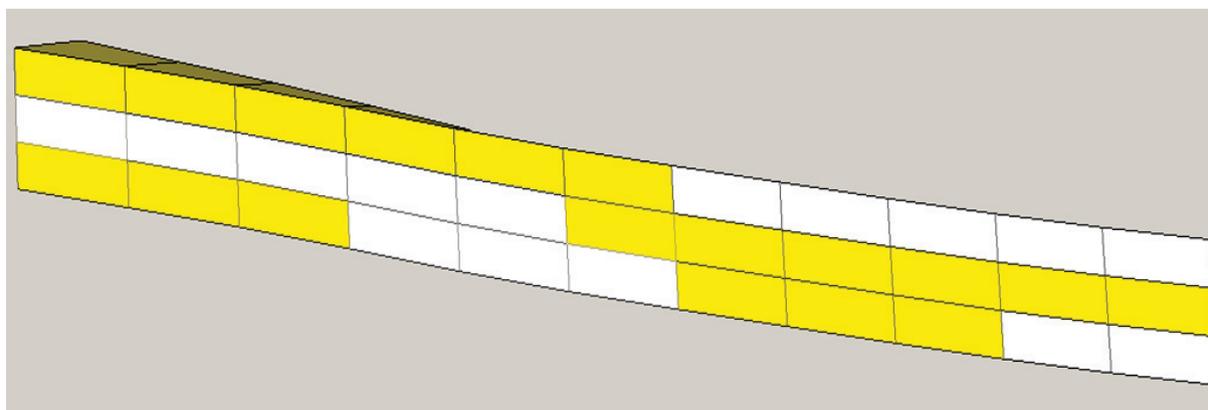


Рис. 7. Срез трех слоев модели месторождения по песчаности

### Выводы

Приложение «ScaleUp» позволяет подвести обоснованную теоретическую базу под апскейлинг моделей, что невозможно при ручном апскейлинге, а также экономит время, затрачиваемое на данную процедуру. Широкий спектр направлений развития приложения (таких как добавление других алгоритмов ремасштабирования, проведение ремасштабирования не только по слоям модели, но и по латерали, апскейлинг неструктурированных сеток) и его успешное тестирование на реальных моделях месторождений дает все основания для продолжения работ с целью внедрения в приложение новых возможностей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gautier Y., Blunt M. Nested gridding and streamline-based simulation for fast reservoir performance prediction. – Allen: Society of Petroleum Engineers, 1999. – 10 p.
2. Лазарева В.Г. Некоторые аспекты, которые необходимо учитывать в гидродинамическом симуляторе при адаптации работы скважин на историю разработки // Успехи современного естествознания. – 2006. – № 11. – С. 65–66.
3. Закревский К.Е., Майсюк Д.М., Сыртланов В.Р. Оценка качества 3D моделей. – М.: ООО «ИПЦ Маска», 2008. – 272 с.
4. Stephen K.D., Gillian E.P. Steady State Solutions of Immiscible Two-Phase Flow in Strongly Heterogeneous Media: Implications for Upscaling. – Allen: Society of Petroleum Engineers, Heriot-Watt University, 2005. – 13 p.
5. Christie M.A. Tenth SPE Comparative Solution Project: A Comparison of Upscaling Techniques. – Allen: Society of Petroleum Engineers, 2001. – 13 p.
6. King M.J. Optimal Coarsening of 3D Reservoir Models for Flow Simulation. – Allen: Society of Petroleum Engineers, 2006. – 18 p.

Поступила 16.04.2012 г.