



УДК 004.94

**ИНТЕГРИРОВАННЫЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС
ТЕСТИРОВЩИКА ГЕОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ****INTEGRATED PROGRAMMING COMPLEX
OF THE TESTER OF GEOLOGICAL MODELS****В.Б. Таранчук
V.B. Taranchuk**

Белорусский государственный университет, Беларусь, 220030, г. Минск, пр. Независимости, 4

Belarusian State University, 4, Nezavisimosti Ave., Minsk, 220030, Belarus

E-mail: taranchuk@bsu.by

Аннотация

В работе обсуждаются вопросы проектирования, разработки, инструментального наполнения, использования интегрированного программного комплекса тестировщика цифровых геологических и геоэкологических моделей. Отмечены преимущества предлагаемой технологии сборки компонент комплекса путем синтеза программных модулей систем компьютерной алгебры и географических информационных систем. Излагаются методические и технические решения задач построения, анализа эталонных и аппроксимирующих реальные объекты цифровых полей распределений параметров, характеризующих геологические тела, с возможностями имитации типичных элементов и особенностей таких распределений. Иллюстрируются несколько вариантов одномерной, двумерной и трехмерной интерактивной визуализации изучаемых моделей, сопоставления результатов и оценки точности. Рассмотрены примеры получения и разных способов наглядного представления сечений и разрезов трехмерных объектов. Презентованы результаты работы алгоритма адресного уплотнения сейсмических профилей, приведенные карты изолиний наглядно иллюстрируют возможности алгоритма.

Abstract

In this paper are considered questions of designing, development, tool filling and usages of the integrated program complex of the tester of digital geological and geoecological models. The advantages of an offered process engineering of assemblage of components of the complex by synthesis of program units of computer algebra systems and geographic information systems are substantiated. Methodical and technical decisions of problems of construction, analysis of digital fields of distributions of parameters of reference and approximating real objects characterizing geological bodies with possibilities of imitation of typical elements and features of such distributions are stated. Some variants of one-dimensional, two-dimensional and three-dimensional interactive visualization of studied models, comparisons of results and an accuracy estimation are illustrated. Examples of reception and different ways of evident representation of incisions and cross-sections of three-dimensional objects are considered. Results of work of algorithm of address consolidation of the seismic profiles are presented, the resulted maps of isolines visually illustrate algorithm possibilities.

Ключевые слова: цифровая геологическая модель, система *Mathematica*, система Surfer, интерактивная графическая визуализация.

Keywords: digital geological model, system *Mathematica*, system Surfer, interactive graphics visualization.

Введение

Построение цифровых геологических, геоэкологических моделей стало в настоящее время обязательной составляющей экспертных заключений в ряде сфер



деятельности, в частности, при ведении государственного мониторинга состояния окружающей среды, недр, в задачах рационального использования минерально-сырьевой базы, в проектах защитных мероприятий, связанных с описанием рельефа и инженерно-геологического строения местности, при планировании подземных хранилищ газа. Особую роль геологические модели имеют при обосновании проектов разработки месторождений углеводородов. Современная геологическая модель содержит обобщенное описание состава, структуры, формы изучаемых объектов, состояния изучаемого фрагмента земной коры на разных стадиях. Она включает не только описание, рисунок геологического строения, но и цифровые характеристики, обеспечивающие получение с необходимой точностью и графическую визуализацию объемного распределения в пространстве структурно-вещественных комплексов модели.

Геологическое моделирование является самостоятельным направлением, которое включает развитие математических методов и алгоритмов; разработку компьютерных программ, обеспечивающих цикл построения моделей, формирования, наполнения и сопровождения баз данных. Соответствующее программное обеспечение включает загрузку из разных источников и предобработку данных, корреляцию, формирование цифровых кубов фильтрационно-емкостных свойств, интерактивный анализ данных, визуализацию с применением графики любого типа, картопостроение. Построение цифровых геологических моделей является в странах СНГ относительно молодым направлением, оно активно развивается, но пока крупные государственные и частные компании потребители соответствующих программных комплексов предпочитают разработки мировых лидеров. Актуальной является задача разработки и внедрения альтернативных компьютерных геологических моделей. Одной из важнейших составляющих при этом является задача оценки адекватности и точности предлагаемых цифровых моделей, ключевыми являются вопросы автоматизации настройки, адаптации моделей с учетом постоянно поступающих дополнительных данных, а также ревизии результатов обработки исходной информации с использованием новых методов интерпретации. Программирование, реализация алгоритмов построения и адаптации геологических моделей трудоемко, предполагает использование уникальных математических методов. Например, из опыта разработки, сопровождения и внедрения комплекса «ГеоБазаДанных» [Буйкис и др., 1985; Барвенов и др., 2001; Таранчук, Таранчук, 2005; Таранчук, 2006] следует, что для поддержания его в актуальном состоянии, отвечающем постоянно возрастающим аппаратным возможностям, нужен большой коллектив опытных программистов.

Представляется, что в настоящее время более эффективным, обеспечивающим заметно более низкие трудозатраты и относительно быстрым по времени будет подход, основанный на сочетании и интеграции в единый программный комплекс модулей современных версий систем компьютерной алгебры (СКА) и географических информационных систем (ГИС). При этом следует понимать, что для решения задач обработки исходных данных, в частности, результатов дистанционного зондирования, сейсмо- и магниторазведки, моделирования, никакая конкретная ГИС не является полным набором пространственно-аналитических методов и средств анализа. Во многих случаях приходится комбинировать инструменты ГИС с программами статистического анализа данных, средствами для математически сложных вычислений, включающих реализации современных методов и алгоритмов анализа и интерпретации пространственных данных.

Основные положения

В предлагаемом подходе при решении задач математического моделирования объектов геологии, подземной гидродинамики развивается концепция, следуя которой ядром и основой для построения компьютерных геологических моделей является цифровое описание ограничивающих объем поверхностей. При этом основным этапом является построение генерализованных поверхностей, описывающих топологию объекта,



последовательность залегания геологических тел, слоев, то есть своеобразная структурная «этажерка» [Булыгин, Булыгин, 1996; Таранчук, 2006]. Для структурированной по слоям трехмерной геологической модели применим подход построения в режиме «конструктор», когда сборка и редактирование модели производятся по частям, которыми служат отдельные геологические элементы. Для слоев в описание включаются распределения изучаемых параметров. Исходными данными для этих описаний, как правило, являются значения наблюдаемого параметра в пунктах которые размещены на площади нерегулярно, например, данные замеров по сейсмическим профилям, разведочным скважинам [Aziz, Settari, 1979].

Отметим предложенные и реализованные методические и технические решения, программные компоненты, которые включены в интегрированный компьютерный комплекс «Генератор геологической модели залежи» (ГГМЗ). Назначение комплекса - создание и оценки точности настраиваемых геологических моделей на основе применения СКА, ГИС, «умных» методов адаптации моделей в процессе их эксплуатации, «самоастройки» моделей с учётом дополняемых данных фактического развития процессов. Платформа разработки комплекса - система компьютерной алгебры *Mathematica* (WOLFRAM MATHEMATICA), язык Wolfram Language [Таранчук, 2015а, Таранчук, 2015в], геоинформационная система Golden Software Surfer [SURFER]. При программировании на языке Wolfram Language реализованы технические решения, описанные в [Таранчук, 2015б; Taranchuk, Kulinkovich, 2015а], причем программный комплекс в конкретной конфигурации может эксплуатироваться после сборки и сохранения в формате вычисляемых документов CDF. Расчеты, работа пользователя с CDF версией приложения возможна на любом персональном компьютере. При просмотре CDF версии, размещенной на вебсервере, программа просмотра автоматически подгружается в виде плагина браузера. Автономная работа с ПК возможна после инсталляции свободно распространяемого CDF Player. Варианты дополнительных настроек, обеспечивающих интерактивность CDF версии, изложены в [Taranchuk, Kulinkovich, 2015b; Таранчук, 2014а.; Таранчук, 2014б].

Компоненты компьютерного комплекса ГГМЗ

Для иллюстрации реализаций отмеченного выше приведем пояснения, результаты использования отобранных и модифицированных для решаемых задач программных модулей. В изложении ниже упомянуты компоненты, фактически являющиеся автономными программными модулями. Их также можно позиционировать, как составные части автоматизированного рабочего места специалиста, который в вычислительных экспериментах отрабатывает приемы адаптации используемых при построении геологических моделей цифровых полей. Следует отметить важное техническое решение - все этапы работы с модулями комплекса обеспечены функциями импорта и экспорта результатов с несколькими вариантами настроек форматов. Это обеспечивает пользователя дополнительными возможностями выполнения аналогичных расчетов в разных (в том числе других) приложениях, сопоставления результатов.

Следует понимать, что создание и сопровождение геологической модели не предполагают нахождение единственного решения некоторой математической задачи. Субъективное мнение, квалификация эксперта - факторы, всегда присутствующие в подобной деятельности [Халимов, 2012]. При создании моделей приходится оперировать с данными, точность которых различна, а некоторые исходные данные вовсе противоречивы; на разных участках плотность данных с замерами значительно различается. Поэтому для построения цифровых моделей важно иметь инструменты интерактивной обработки данных, имитации возможных ситуаций получения и коррекции входной информации, модули математической обработки и статистического анализа [Морозов, Таранчук, 2005; Таранчук, 2008]. Все этапы работы с данными в ГГМЗ включают разнообразные варианты графической визуализации, протоколирование и



сопоставление получаемых или помещенных в архив результатов [Таранчук, 2009; Barovik, Taranchuk, 2010]. Инструменты комплекса обеспечивают пользователя возможностями «поиграть» исходными данными и сопоставить результаты с подготовленными эталонами, причем, с возможностями импорта и экспорта данных и изображений, масштабирования. Широкие возможности обмена данными важны для одновременной работы в нескольких программных средах.

В программном комплексе ГГМЗ реализованы следующие средства:

- инструменты и шаблоны для подготовки эталонной модели цифрового поля, отвечающего оговоренным свойствам («Конструктор цифрового поля»);
- средства и несколько вариантов модулей «искажения» эталонной модели;
- инструменты имитации «съема» данных, которые используются в практике моделирования («Генератор профиля наблюдения»);
- модули расчета, визуализации, сопоставления аппроксимирующих цифровых полей несколькими разными методами (компонент «Аппроксимация»);
- инструменты и модули адаптации («доводки») формируемой цифровой модели (компонент «Адаптация»).

Этапы подготовки типовой эталонной модели

Конструктор цифрового поля (КЦП). Программные модули этой группы обеспечивают в режиме интерактивной работы конструирование из типовых элементов с сопутствующей визуализацией математического описания (аналитической функции) модели поверхности, интерпретируемой, как рельеф - совокупность фрагментов разных форм поверхности. Конструирование осуществляется в запрограммированном в системе *Mathematica* модуле, включает составление уравнения поверхности - непрерывной (или кусочно-непрерывной) определенной в прямоугольнике функции двух аргументов x и y . Пользователем задаются границы области определения x_{Min} и x_{Max} , y_{Min} и y_{Max} и ограничения поверхности по высоте z_{Min} и z_{Max} . Заметим, что приведенные здесь и далее обозначения даются в формате InputForm (строковый формат), что принято специально, так как отдельные пользователи могут применять приложения, написанные в Excel, на языках Delphi, C или других, где в кодах программ математическая нотация не поддерживается. В комплекте (библиотеке) составных частей формируемой функции есть математические выражения (элементы), обеспечивающие воспроизведение участков поведения, характерных для рельефа местности. Пользователь на первом этапе формирования эталонной поверхности составляет кусочно-заданную функцию $z_{Basic}(x)$, базовый профиль - ленту заданной ширины и длины, имитирующую типы рельефа с элементами плато, склон, откос, обрыв. Затем можно дополнить базовую поверхность возмущениями разной формы, размеров и ориентации. Составление средствами КЦП базового профиля из фрагментов возможно с переходом «фрагмент - добавленный фрагмент» непрерывным образом, гладким переходом, скачком (имитация разлома). В случае непрерывного, гладкого переходов параметры склейки кусочно-заданной функции определяются автоматически программным модулем.

Простейший вариант определения функции и задания базового профиля записан в выражении (1):

$$\begin{aligned}
 z_{Basic}(x) = & \text{If}[x_{Min} \leq x \leq x_{Otk1}, f_{Plt}(x,0),0] + \text{If}[x_{Otk1} < x \leq x_{Otk2}, f_{Otk}(x,0),0] + \\
 & + \text{If}[x_{Otk2} \leq x \leq x_{Sk12}, f_{Plh}(x,0),0] + \text{If}[x_{Sk12} \leq x \leq x_{Max}, f_{Sk1}(x,0),0]; \\
 f_{Plt}(x, y) = & z_{Plt}; \quad f_{Plh}(x, y) = f_{Otk}(x, y) - \text{perkoeff} \times (x - x_{Otk2})^2; \\
 f_{Otk}(x, y) = & z_{Plt} + \text{Tan}(ug_{Otk}) \times (x - x_{Otk1}); \quad z_{Otk2} = f_{Otk}[x_{Otk2}, 0]; \\
 f_{Sk1}(x, y) = & z_{Sk12} + \text{Tan}(ug_{Sk1}) \times (x - x_{Sk12}); \quad z_{Sk12} = f_{Plh}(x_{Sk12}, 0).
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

На рис. 1 приведена иллюстрация, где в правой части показан 3D график с применением градиентной раскраски (оттенки оранжевого цвета) по уровню

поверхности, и дополнительно пунктирными линиями показаны 10 промежуточных линий-уровней (равномерная сетка по переменной z). Константы в выражении (1): $x_{Min}=50.0$, $x_{Max}=250.0$, $y_{Min}=-0.0$, $y_{Max}=160.0$, $z_{Min}=0.0$, $z_{Max}=10.0$, $x_{Otk1}=110.0$, $x_{Otk2}=170.0$, $x_{Sk12}=190.0$, $z_{Plt}=1.0$, $ug_{Otk}=0.08$, $ug_{Sk1}=0.01$, x_{Otk1} , x_{Otk2} – координаты точек перехода «плато – откос», «откос – пологий склон», ug_{Otk} и ug_{Sk1} определяют наклон откоса и склона. В приведенном примере модель базовой поверхности, является квазитрехмерной (уровень z не зависит от y). Базовая поверхность (лента) составлена из 3-х типовых участков: плоский горизонтальный (плато), плоский быстрого возрастания уровня (откос), плоский медленного возрастания (пологий склон). Стыковка участков – непрерывно. Переход плато – откос осуществлен под заданным углом, переход откос – пологий склон осуществлен непрерывным и гладким.

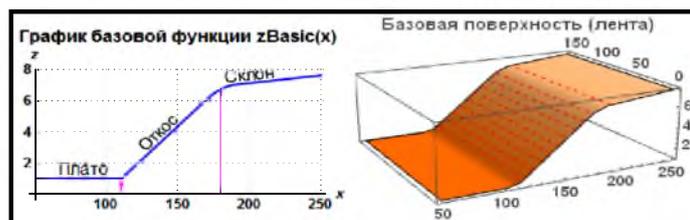


Рис. 1. График базовой поверхности. Профиль и 3D вид
Fig. 1. Plot of basic surface. Profile and 3D view

Следующий этап конструирования – использование инструментов программного модуля для дополнения базового профиля возмущениями, фрагментами типовых элементов рельефа. Библиотека шаблонов включает элементы, которые соответствуют возмущениям (участкам искажений базовой поверхности) разной геометрической формы. При подключении шаблонов предусмотрены возможности интерактивного задания их положения и размеров. В основной комплект включены математически описываемые элементы, которые имитируют следующие формы рельефа: холм, насыпь, яма, выемка, траншея, канал, карьер, овраг, впадина. Следует отметить, что все перечисленные выше элементы могут задаваться всего двумя выражениями типа $z = fFrgm(x,y)$. Причем, таковые записываются для квадрата $[-1,1] \times [-1,1]$, а затем в итоговой функции аргументы масштабируются (варианты записи ниже). Например, для описания формы типа холм можно использовать функцию вида (2):

$$fHill(x, y) = \begin{cases} \cos(\pi x / 2) \times \cos(\pi y / 2), & -1 \leq x \leq 1 \wedge -1 \leq y \leq 1 \\ 0 & \text{иначе} \end{cases} \quad (2)$$

Следует отметить, что описание возмущения типа яма – такое же выражение, но со знаком минус. Это же выражение можно использовать для имитации гладких форм типа насыпь, выемка, канал, карьер, овраг, меняя множители перед аргументами.

Выражение для элемента типа траншея (с вертикальными стенками):

$$fTrench(x, y) = \begin{cases} -1, & -0.5 \leq x \leq 0.5 \wedge -1 \leq y \leq 0.5 \\ 0 & \text{иначе} \end{cases} \quad (3)$$

Формы элементов типа насыпь, канал, карьер, овраг с вертикальными стенками также описываются выражением вида (3).

Система *Mathematica* содержит большое количество пространственных графических примитивов, из которых в КЦП используются: конус, шар, цилиндр, кубоид, а также в библиотеку включены разные пирамиды, в частности простейшая форма, которая задается выражением (4)

$$fPyramid(x, y) = \begin{cases} 1 - \max(|x|, |y|), & |x| < 1 \wedge |y| < 1 \\ 0 & \text{иначе} \end{cases} \quad (4)$$

Пример формирования модели эталонной поверхности, полученной на основе базовой, дополнением элементами перечисленных типов (2 пирамиды, 2 холма, яма,



траншея, насыпь) приведен на рис. 2. Показаны 3D графики сформированной поверхности в двух разных ракурсах обзора, дополнительно в изображениях формы поверхности прорисованы характерные линии-уровни (пунктирные красные линии). Следует обратить внимание на то, что элементы-возмущения автоматически «привязываются» к базовой поверхности на всех типах участков (плато, откос, склон).

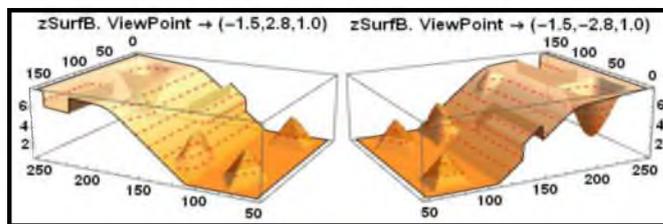


Рис. 2. Графики поверхности с типовыми элементами рельефа
Fig. 2. Plots of surface with typical elements of relief

Аналитическое выражение включает приведенные выше аналитические выражения, для сформированной и показанной (см. рис. 2) поверхности следующее:

$$zSurfB(x, y) = fOriginA(x, y) + 3 \times fPyramid2[0.05 \times (x - 75), 0.03 \times (y - 124)] + 3 \times fPyramid1[0.06 \times (x - 76), 0.07 \times (y - 24)] + 3.1 \times fHill[0.1 \times (x - 117), 0.04 \times (y - 127)] - 1.4 \times fTrench[0.06 \times (x - 140), 0.01 \times (y - 32)] + 1.4 \times fHill[0.08 \times (x - 68), 0.08 \times (y - 128)] + 1.5 \times fTrench[0.04 \times (x - 230), 0.02 \times (y - 144)] - 5 \times fHill[0.05 \times (x - 220), 0.04 \times (y - 36)],$$

$$fOriginA(x, y) = zBasic(x).$$

Существенно, что в получаемом итоговом уравнении (5) коэффициенты в формулах элементов-возмущений $fHill$, $fPyramid$, $fTrench$ определяются в программном модуле действиями пользователя при визуальном конструировании. В модуле КЦП есть возможность определять все коэффициенты составляемого выражения функции при визуальном контроле по графикам путем перемещения ползунков или заданием конкретных значений на панелях, являющихся частью интерфейса функции Manipulate системы Mathematica (подробно описано в [Taranchuk, Kulinkovich, 2015a]).

На рис. 3 приведен пример формирования модели второй эталонной поверхности с несколько другим позиционированием. Для примера также изменены размеры двух элементов. Поверхность приподнята на 2.5, уровень глубины ямы 5 заменен на 2.3, изменены ширина и высота насыпи. Соответствующее аналитическое описание задается выражением (6):

$$zSurfB(x, y) = fOriginA(x, y) + 2.5 + 3 \times fPyramid2[0.05 \times (x - 75), 0.03 \times (y - 124)] + 3 \times fPyramid1[0.06 \times (x - 76), 0.07 \times (y - 24)] + 3.1 \times fHill[0.1 \times (x - 117), 0.04 \times (y - 127)] - 1.1 \times fTrench[0.04 \times (x - 140), 0.01 \times (y - 32)] + 1.4 \times fHill[0.08 \times (x - 68), 0.08 \times (y - 128)] + 1.5 \times fTrench[0.04 \times (x - 230), 0.02 \times (y - 144)] - 2.3 \times fHill[0.05 \times (x - 220), 0.04 \times (y - 36)].$$

Иллюстрации поверхностей даны на рис. 3, их можно интерпретировать, как кровлю и подошву пласта. Обе поверхности выводятся с разными интерактивно настраиваемыми пользователем уровнями прозрачности (в данном примере для нижней 0.8, для верхней 0.4).

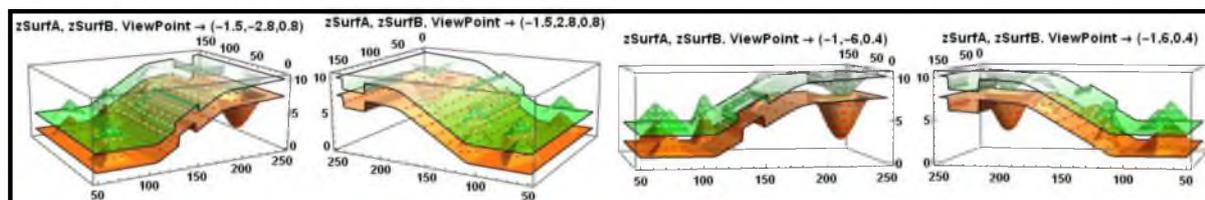


Рис. 3. Графики двух подобных поверхностей
Fig. 3. Plots of two similar surfaces



Важно, что по сравнению с выражением (5) в (6) изменены только коэффициенты. Также следует отметить, что приведенная иллюстрация – результат визуального воспроизведения формы поверхности z_{SurfB} (составители и эксперты, как правило, работают с геологическими моделями визуально). Точное воспроизведение в другой системе координат также возможно, тогда надо к исходным графическим объектам применять функции 3D преобразований, включенные в ядро системы *Mathematica* (см., например, [Taranchuk, Kulinkovich, 2015b; Taranchuk, Zhuravkov, 2016]).

Инструменты визуализации моделей

В комплексе ГМЗ реализованы более десяти вариантов 1D, 2D и 3D графики [Баровик, Таранчук, 2007; Таранчук, 2009], в том числе модули получения и оформления карт и вставок на них, графиков на профилях, 3D визуализации возможных разрезов (вертикальные, горизонтальные), простых и сложных отсечений (рис. 4-7). Иллюстрации применения нескольких инструментов визуализации разрезов и отсечений даны ниже на примере эталонной поверхности, но все модули этой группы могут использоваться для любых уравнений поверхностей или цифровых описаний распределений, получаемых либо экспортируемых в комплекс.

Визуализация профилей. Поясним примеры получения в ГМЗ графиков геологических профилей, иллюстрации приведены на рисунках 4-6. Геологический профиль представляет собой графическое изображение в вертикальной плоскости строения недр и содержащихся в них залежей. В рассматриваемом случае профиль – линия, получаемая на пересечении анализируемой поверхности вертикальной плоскостью заданного направления.

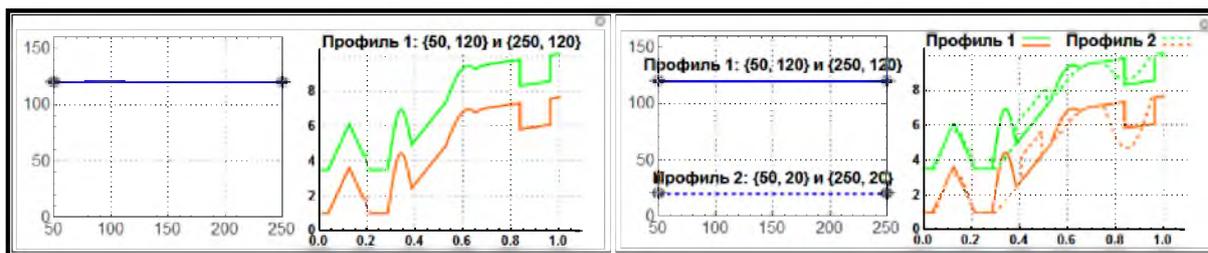


Рис. 4. Пример указания профилей локаторами, графики сечений
Fig. 4. Example of indicating of profiles by locators, graphics of cross-sections

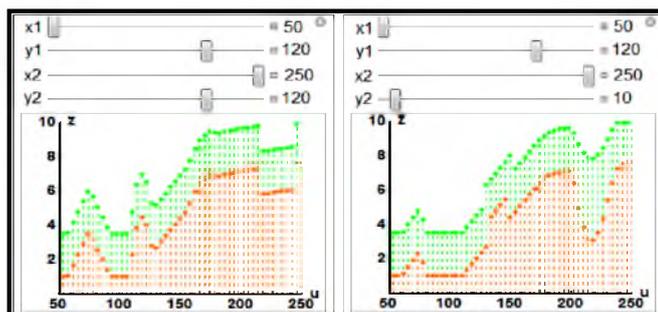


Рис. 5. Пример указания профилей бегунками, графики сечений
Fig. 5. Example of indicating of profiles by scroll boxes, graphics of cross-sections

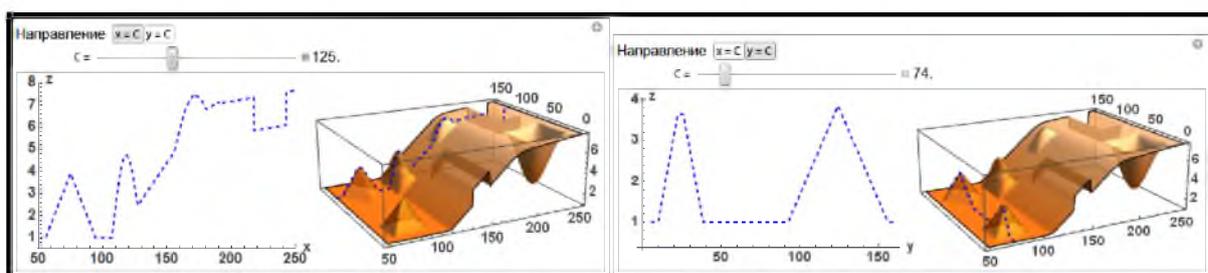


Рис. 6. Панель работы с профилем, вариант 3D и 1D графики
Fig. 6. Profile work panel, option of 3D and 1D plots

Отметим основные варианты интерфейса для указания и примеры визуализации профилей. Пользователь комплекса имеет возможность на схеме плана области моделирования (на фрагментах рис. 4 слева) перемещать локаторы (начало, конец профиля), соответственно на графике (справа) прорисовывается распределение итоговой функции модели поверхности (одной или нескольких) на указываемом направлении. Начало и конец профиля не обязательно должны быть на границах области определения функции, можно выбрать любой интересующий пользователя участок, соответственно детализировать поведение функции. В такой реализации по оси абсцисс откладываются деления в долях единицы длины профиля. Также есть возможность сопоставления уровней поверхности на двух профилях – фрагмент в правой части рис. 4.

Рис. 5 содержит скриншоты двух окон панели настройки и результатов. Это иллюстрирует другой вариант, обеспечиваемый соответствующим модулем ГМЗ – другой способ задания координат начал и концов профилей.

В реализации интерфейсов на рис. 4 и 5 есть возможность задания координат начал и концов профилей не изменением положения локаторов, а перемещением ползунков на шкале или вводом нужного числа – поле ввода открывается по клику плюсики. В примерах рис. 4 и 5 детализация формы поверхности осуществляется визуализацией с использованием 2D и 1D графики.

На рис. 6 показан вариант визуализации с использованием 3D и 1D графики. Программный модуль предоставляет пользователю возможности выбора направления (переключатель – две кнопки в верхней части панели) и задания конкретного положения секущей плоскости, манипулируя бегунком, или, задавая нужное значение. При этом направление сечения (синяя пунктирная) показывается на 3D графике поверхности, а в левой части окна выводится профиль.

Визуализация разрезов, сечений. Примеры графической визуализации разрезов показаны на рис. 7. В составе ГМЗ есть интерактивные модули с панелями указания значений координат для 3D визуализации возможных разрезов (вертикальные, горизонтальные), отсечений (простые и сложные).

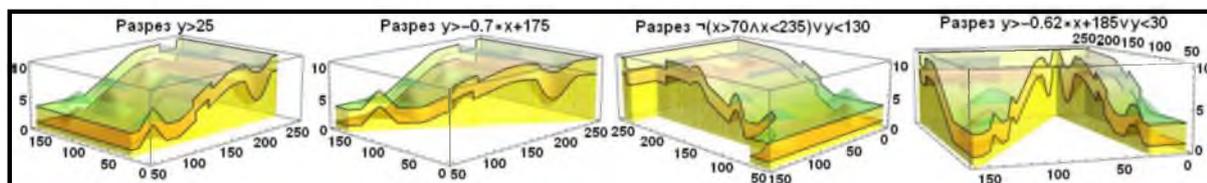


Рис. 7. Примеры вывода простых и сложных профильных разрезов

Fig. 7. Examples of the output of simple and complex incisions

На рис. 7 показаны иллюстрации простых профильных разрезов (2 фрагмента слева, при одной вертикальной секущей плоскости) и сложных профильных разрезов (2 фрагмента справа). Формулы задания секущих плоскостей даны в заголовках графиков; для двух левых графиков ракурс осмотра (-3,1,1), для правых – (-2,2,0.7) и (-3,1,0.4). Приведенные на иллюстрациях формулы задания разрезов могут быть полезны при работе (параллельно или отдельно) для сопоставления в других программных системах, в комплексе ГМЗ все выполняется интерактивно с визуальным контролем по графикам. Следует отметить, что интерфейс модуля при указании секущих плоскостей аналогичен инструментам типа, как на рис. 4, 5; действия выполняются пользователем интерактивно. Также средства системы позволяют, зафиксировав какую-либо конфигурацию секущих плоскостей, просматривать 3D модель объекта интерактивно меняя ракурс, масштаб, относительное положение; примеры соответствующих настроек приведены в [Таранчук, 2009; Таранчук, 2015б, Taranchuk, Kulinkovich, 2015a]. В число инструментов настройки вида модели также включены индикаторы, выпадающие меню, ползунки для



управления/выбора цветовой схемы раскраски поверхности или текстуры, уровня прозрачности модели и способа освещения.

Конечно же, в число инструментов визуализации моделей входят карты изолиний и зон (плотности), примеры которых приведены ниже.

Инструменты имитации сбора данных и картопостроения

При создании геологических моделей основными источниками данных, которые, в частности, всегда присутствуют при поиске и подготовке объектов к бурению на нефть и газ, являются результаты сейсморазведки, грави- и магниторазведки. В практических условиях сейсморазведочные прогнозы обычно оказываются неоднозначными, неустойчивыми, так как сейсморазведка обусловлена разного рода погрешностями. С другой стороны, направлением совершенствования технологии сеймопрофилирования является разработка и обоснование метода адресного уплотнения сейсмических профилей. Составная часть этой технологии - проектирование сети сейсмических профилей с определенной плотностью и относительной равномерностью. В настоящем изложении не обсуждаются вопросы предобработки данных сейсморазведки и проектирования системы сеймопрофилей, что будет предметом отдельного изложения. Упомянуты и иллюстрируются средства генератора профиля наблюдения комплекса ГГМЗ, которые могут использоваться при оценках эффектов оптимизации сети сейсморазведочных профилей – как в варианте «ручной» работы (эксперт интерактивно определяет схему), так и в автоматическом режиме, когда исполняющий модуль компонента «Адаптация», обрабатывая определенную исходную информацию, предлагает на выбор несколько вариантов схем. Ниже примерами поясняются инструменты генератора профиля наблюдения, рекомендуемая для сопровождения такого анализа графика.

Интерфейс задания или изменения схемы профилей наблюдения аналогичен заданию профильных разрезов. На плане (схеме) области определяются направления, на каждом фиксируются начальная и конечная точки профиля, а также число точек замеров (пикетов в случае сеймопрофилей). Примеры показаны на рис. 8. Отметим, что иллюстрации подготовлены не для того, чтобы показать лучший результат создания модели, а для пояснения шагов работы пользователя, инструментов ГГМЗ. Другой существенный аспект – иллюстрируются фрагменты карт в изолиниях, то есть 2D графика, а не трехмерные виды, так как на 3D изображениях обсуждаемые детали мало различимы. Алгоритм подготовки приведенных иллюстраций следующий. Пользователь, используя упомянутые выше интерактивные инструменты, рисует схему профилей, задавая на каждом число узлов. В отдельном программном модуле ГГМЗ для каждого узла формируются пять чисел: номера профиля и узла, координаты x и y , вычисленное значение функции поверхности в точке-узле. Упомянутые пятерки чисел экспортируются в файл, пользователь выбирает формат из предлагаемых вариантов; в том числе это может быть экспорт в .XLS (XLSX, CSV). Заметим, что такая имитация получения данных по уровням поверхности в точке замера дает точное значение, но отдельно в ГГМЗ есть инструменты «искажения результатов наблюдений» (на каждом отдельном профиле) наложением шумов с использованием наборов разных функций с осцилляциями и генераторов случайных чисел [Морозов, Таранчук, 2005].

Затем, пользователь в доступном ему приложении по рассеянному множеству точек замеров, используя один из выбираемых алгоритмов, строит аппроксимирующее цифровое поле [Таранчук, 2006; Таранчук, 2009]. Например, в [SURFER] для интерполяции, экстраполяции предлагаются более пяти методов. Пользователь может экспериментировать с методами: триангуляция с линейной интерполяцией (Triangulation with Linear Interpolation), минимальной кривизны (Minimum Curvature), полиномиальной регрессии (Polynomial Regression), степени обратного расстояния (Inverse Distance to a Power), Шепарда (Shepard's Method), радиальных базисных функций (Radial Basis Functions), геостатистический метод построения сети Крайгинга (Kriging). Можно



использовать любой из этих методов, проводить сопоставление результатов с эталонным полем и восстанавливаемыми по разным алгоритмам.

На рис. 8 показаны результаты сопоставления эталонного цифрового поля и восстановленных по множеству точек на профилях. На рис. 8 слева показаны результаты сопоставления эталонного цифрового поля и восстановленного по множеству 107 точек на профилях, узлы показаны разными примитивами синего цвета. Схема профилей – одна из предложенных экспертом, которому была дана информация о форме базовой поверхности и положении фрагментов-возмущений. Сплошными красными полилиниями даны изолинии эталонного цифрового поля, построенного по аналитически заданному распределению $z_{\text{SurfA}}(x,y)$; уровни изолиний подобраны и заданы так, чтобы площадь на участках не плато была покрыта изолиниями относительно равномерно. Синими пунктирными полилиниями показаны изолинии тех же уровней, но для функции, сформированной в системе *Mathematica* методом интерполяции второго порядка. Красными кружками отмечены представительные контрольные точки фрагментов-возмущений, которые также использованы при аппроксимации. В данном примере в расчете учитывались 107 узлов. Пример дается для демонстрации инструментов ГМЗ и возможных вариантов действий пользователя, выбран не лучший метод интерполяции.

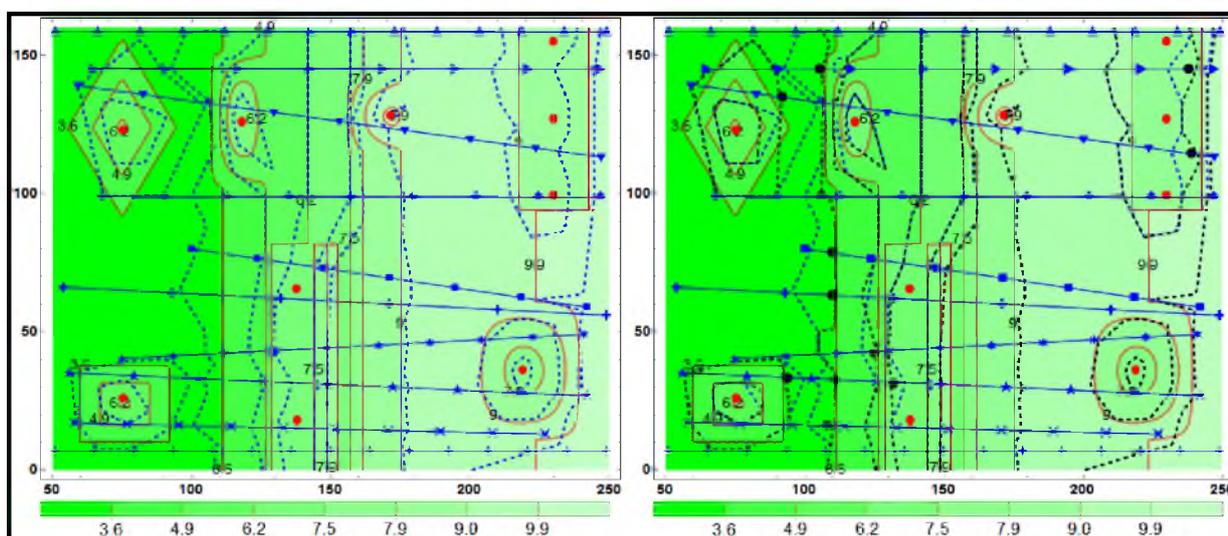


Рис. 8. Изолинии полей эталонного и восстановленного по 107 (слева) и 119 узлам
 Fig. 8. Isolines of reference and reconstructed by 107 (at the left) and 119 nodes fields

Результаты работы предложенного и запрограммированного алгоритма адресного уплотнения сейсмических профилей из программного компонента «Адаптация» показаны на рис. 8 справа. Узлы второй сети точек наблюдений, дополняющие первую (12 узлов), показаны черными примитивами. Следуя методу, новые узлы дополняют предыдущие, причем они размещаются на первоначальных профилях. Модуль комплекса, в котором реализован алгоритм метода адресного уплотнения, предлагает пользователю для принятия несколько вариантов, один из которых и приведен. Как и в примере рис. 8 слева, но уже по второму множеству точек с замерами на рис. 8 справа показаны черными пунктирными полилиниями изолинии функции, сформированной в системе *Mathematica* тем же методом, но по 107 + 12 узлам. Сопоставление конфигураций изолиний показывает, что новое цифровое поле заметно точнее воспроизводит эталонное.

Отдельно отметим, что в комплексе есть инструменты оценки в разных нормах погрешностей любым способом восстановленного цифрового поля по эталонному, причем, на выбираемых участках (интегральные показатели) или локально с выводом карты плотности распределения погрешности.



Заклучение

Описаны и проиллюстрированы примерами инструменты автоматизированного рабочего места специалиста, который в вычислительных экспериментах может выполнять анализ и адаптацию цифровых полей применительно к задачам формирования геологических моделей. Разработанная интегрированная компьютерная система дает возможности манипулирования исходными данными, сопоставления цифровых геологических моделей, формирования эталонов, подготовки наборов данных для возможных интерпретаций экспертов, анализа получаемых разными способами результатов.

Список литературы References

1. Aziz K., Settari A., 1979. Petroleum Reservoir Simulation. Applied Science Publishers Ltd, London, 476.
2. Barovik D.V., Taranchuk V.B., 2010. Mathematical Modelling of Running Crown Forest Fires. *Mathematical Modelling and Analysis*. 2(15): 161–174.
3. SURFER. Available at: <http://www.goldensoftware.com/products/surfer>.
4. Taranchuk V., Kulinkovich V., 2015a. On the preparation and distribution of interactive graphics applications using Mathematica. *Computer Algebra Systems in Teaching and Research*. Vol. V. University of Natural Sciences and Humanities. Poland, Siedlce: 380–387.
5. Taranchuk V., Kulinkovich V., 2015b. On programming interactive graphic applications in Mathematica system. *Computer Algebra Systems in Teaching and Research*. Vol. V. University of Natural Sciences and Humanities. Poland, Siedlce: 388–395.
6. Taranchuk V.B., Zhuravkov M.A., 2016. Methods and tools of development of interactive teaching materials on the computer mechanics. *Studia i Materialy*. 11: 69–83.
7. WOLFRAM MATHEMATICA. WOLFRAM COMPUTATION MEETS KNOWLEDGE. Available at: <http://www.wolfram.com/mathematica>.
8. Барвенков С.А., Кибаш М.Ф., Таранчук В.Б., 2001. Методика, инструментарий адаптации математических моделей процессов подземной гидродинамики. В кн.: *Выбранные научные работы БДУ*, т. “Математика”, Минск, БГУ, 34–65.
Barvenov S.A., Kibash M.F., Taranchuk V.B., 2001. Methodology, tools for adapting mathematical models of subterranean hydrodynamics. V kn.: *Vybranyya navukovyya pratsy BDU*, t. “Matematika”, Minsk, BGU, 34–65. (in Russian).
9. Баровик Д.В., Таранчук В.Б., 2007. Библиотека модулей визуализации научных данных в системе Mathematica. *Информатизация образования*. 2: 24–31.
Barovik D.V., Taranchuk V.B., 2007. Library of scientific data visualization modules in Mathematica system. *Informatizatsiya obrazovaniya*. 2: 24–31. (in Russian).
10. Буйкис А.А., Золотухин А.Б., Таранчук В.Б., 1985. О программном обеспечении вычислительного эксперимента в задачах неизотермической двухфазной многокомпонентной фильтрации. *Прикладные задачи математической физики*, Рига, ЛГУ, 191–205.
Buykis A.A., Zolotukhin A.B., Taranchuk V.B., 1985. On the software of the computational experiment in the problems of non-isothermal two-phase multicomponent filtration. *Prikladnyye zadachi matematicheskoy fiziki*, Riga, LGU, 191–205. (in Russian).
11. Булыгин Д.В., Булыгин В.Я., 1996. Геология и имитация разработки залежей нефти. М., Недра, 382.
Bulygin D.V., Bulygin V.Ya., 1996. Geology and simulation of the development of oil deposits. М., Nedra, 382. (in Russian).
12. Морозов А.А., Таранчук В.Б., 2005. Программирование задач численного анализа в системе Mathematica: Учеб. пособие. Мн., БГПУ, 145.
Morozov A.A., Taranchuk V.B., 2005. Programming of Numerical Analysis Problems in the Mathematica System: Ucheb. posobie. Мн., BGPU: 145. (in Russian).
13. Таранчук В.Б., 2006. Построение цифровых геолого-экологических моделей в системе ГБД-э. В кн.: *Геоэкология Беларуси*, Минск, Право и экономика, 72–96.
Taranchuk V.B., 2006. Construction of digital geological and ecological models in the system GBD-e. V kn.: *Geoekologiya Belarusi*, Minsk, Pravo i ekonomika, 72–96. (in Russian).



14. Таранчук В.Б., 2008. Математическое и программное обеспечение аппроксимации цифровых полей. Теория вероятностей, случайные процессы, математическая статистика и приложения. Минск, БГУ: 326–334.

Taranchuk V.B., 2008. Mathematical and software for approximating digital fields. Teoriya veroyatnostey, sluchaynye protsessy, matematicheskaya statistika i prilozheniya. Minsk, BGU: 326–334. (in Russian).

15. Таранчук В.Б., 2009. Графический сервис вычислительного эксперимента: учеб.-метод. пособие. Минск, БГУ, 124.

Taranchuk V.B., 2009. Graphical service of computing experiment: ucheb.-metod. posobie. Minsk, BGU, 124. (in Russian).

16. Таранчук, В.Б., 2014а. О применении технологии вычисляемых документов Wolfram при создании электронных образовательных ресурсов. Вести Института современных знаний. 3(60): 102–109.

Taranchuk, V.B., 2014a. On the application of Wolfram's computational documents technology in the creation of electronic educational resources. Vesti Instituta sovremennykh znaniy. 3(60): 102–109. (in Russian).

17. Таранчук, В.Б., 2014б. О создании интерактивных образовательных ресурсов с использованием технологий Wolfram. Информатизация образования. 1(73): 78–89.

Taranchuk, V.B., 2014b. On the creation of interactive educational resources using Wolfram technologies. Informatizatsiya obrazovaniya. 1(73): 78–89. (in Russian).

18. Таранчук, В.Б., 2015а. Введение в язык Wolfram: учеб. материалы для студентов фак. прикладной математики и информатики спец. 1-31 03 04 «Информатика». Минск, БГУ, 51.

Taranchuk, V.B., 2015a. Introduction to Wolfram: ucheb. materialy dlya studentov fak. prikladnoy matematiki i informatiki spets. 1-31 03 04 «Informatika». Minsk, BGU, 51. (in Russian).

19. Таранчук В.Б., 2015б. Возможности и средства Wolfram Mathematica для разработки интеллектуальных обучающих систем. Научные ведомости БелГУ. Сер. Экономика. Информатика. 1(198): 102–110.

Taranchuk V.B., 2015b. Features and tools Wolfram Mathematica for the development of intelligent training systems. Nauchnye vedomosti BelGU. Ser. Ekonomika. Informatika. 1(198): 102–110. (in Russian).

20. Таранчук В.Б., 2015в. Основы программирования на языке Wolfram: учеб. материалы для студентов фак. прикладной математики и информатики спец. 1-31 03 04 «Информатика». Минск, БГУ, 49.

Taranchuk V.B., 2015b. Fundamentals of programming in the language of Wolfram: Textbook materials for students. applied mathematics and informatics special. 1-31 03 04 «Informatics». Minsk, BGU, 49. (in Russian).

21. Таранчук В.Б., Таранчук В.В., 2005. Интерактивная компьютерная система визуализации процессов переноса примесей в почвогрунтах “ГБД-п”. Природопользование. Институт проблем использования природных ресурсов и экологии НАН Беларуси. Мн. 11: 139-143.

Taranchuk V.B., Taranchuk V.V., 2005. Interactive computer system for visualization of processes of impurity transfer in soils “GBD-p”. Prirodopol'zovanie. Institut problem ispol'zovaniya prirodnykh resursov i ekologii NAN Belarusi. Mn. 11: 139-143. (in Russian).

22. Халимов Э.М., 2012. Детальные геологические модели и трехмерное моделирование. Нефтегазовая геология. Теория и практика. 3(7): 1–10.

Khalimov E.M., 2012. Detailed geological models and three-dimensional modeling. Neftgazovaya geologiya. Teoriya i praktika. 3(7): 1–10. (in Russian).