

МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТАРИЙ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ КОМПЬЮТЕРНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Введение. Построение цифровых геологических, геоэкологических моделей является 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. Современная геологическая модель содержит обобщенное описание состава, структуры, формы объектов, состояния изучаемого фрагмента земной коры на разных стадиях. Она включает не только описание геологического строения, но и цифровые характеристики, обеспечивающие получение и графическую визуализацию объемного распределения структурно-вещественных комплексов и компонент модели. Базой геологического моделирования являются методы прикладной математики, алгоритмы обработки данных, реализующие их компьютерные программы. При этом многие отмечают, что понятие геологической модели до настоящего времени не формализовано, и это обусловлено тем, что информационные составляющие модели часто отражают лишь современное состояние геологической науки, ее технических средств и возможности дистанционных методов. Соответствующее программное обеспечение компьютерных геологических моделей включает загрузку из разных источников и предобработку данных, корреляцию, формирование цифровых кубов фильтрационно-емкостных свойств, интерактивный анализ данных, визуализацию с применением графики разных типов, картопостроение.

Создание 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 системы мировых лидеров. Актуальной является задача разработки и внедрения альтернативных компьютерных геологических моделей. Одна из важнейших составляющих при этом – оценка адекватности и точности предлагаемых цифровых моделей, ключевыми являются вопросы автоматизации настройки, адаптации моделей, их сопоставления и оценки точности.

Моделирование объектов геологии предполагает использование сложных математических методов; программирование, реализация алгоритмов построения и адаптации геологических, геоэкологических моделей трудоемко. Например, из опыта разработки, сопровождения и внедрения комплексов «ГеоБазаДанных» ([1, 2]), «ГБД-п», «ГБД-э» ([3, 4]) следует, что для поддержания подобных программных продуктов в актуальном состоянии, отвечающем постоянно возрастающим аппаратным возможностям, нужен большой коллектив опытных программистов. Учитывая текущие возможности по обеспеченности системами компьютерной математики, более эффективным, с заметно более низкими трудозатратами на разработку и сопровождение, относительно быстрым по времени будет подход, основанный на 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.

Теоретической базой при решении задач математического моде-

лирования объектов геологии, подземной гидродинамики является концепция, следуя которой, ядро и основа построения компьютерных геологических моделей – это цифровое описание ограничивающих объемов поверхностей. При этом основным этапом является построение генерализованных поверхностей, описывающих топологию объекта, последовательность залегания геологических тел, слоев, то есть своеобразная структурная «этажерка» [5, 2]. 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 [6]. Представляется, что на данном этапе основой разработки и сопровождения компьютерных геологических моделей должны быть интеллектуальные вычислительные системы, новые «умные» методы адаптации моделей в процессе их эксплуатации, методы «самонастройки» моделей с учетом дополняемых данных фактического развития процессов. Такой подход реализован в компьютерном комплексе «Генератор геологической модели залежи» – ГГМЗ [7, 8].

Основные положения. Отметим предложенные и реализованные методические и технические решения, программные компоненты, которые включены в интегрированный компьютерный комплекс ГГМЗ. Назначение комплекса – тестирование, оценки точности настраиваемых геологических моделей на основе применения СКА, ГИС, «умных» методов адаптации моделей в процессе их эксплуатации, «самонастройки» моделей с учетом дополняемых данных фактического развития процессов. Платформа разработки комплекса – система компьютерной алгебры *Mathematica* ([9]), язык *Wolfram Language* ([10, 11]), геоинформационная система *Golden Software Surfer* [12]. При программировании в системе *Mathematica* модулей графики реализованы технические решения, описанные в [13]. Предусмотрены возможности, когда 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 компонента CDF Player. Варианты дополнительных настроек, обеспечивающих интерактивность CDF версии, изложены в [14, 15].

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 [16]. 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 большой набор инструментов интерактивной обработки данных, имитации возможных ситуаций получения и коррекции входной информации, модули математической обработки данных. Система *Mathematica* обеспечивает пользователей широким набором встроенных функций численного анализа ([17]), методов и функций статистического анализа ([18]). Они подключаются в ГГМЗ простыми обращениями, и все этапы работы с данными в комплексе включают разнообразные варианты графической визуализации, протоколирование и сопоставление получаемых или помещенных в

Таранчук Валерий Борисович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры компьютерных технологий и систем факультета прикладной математики и информатики Белорусского государственного университета.

Беларусь, БГУ, 220050, г. Минск, пр-т Независимости, 4.

архив результатов [19, 11, 13]. Инструменты комплекса обеспечива-ют пользователя возможностью «поиграть» исходными данными и сопоставить результаты с подготовленными эталонами, причем, с возможностями импорта и экспорта данных и изображений, масшта-бирования. Широкие возможности обмена данными важны для од-новременной работы в нескольких программных средах.

Компоненты компьютерного комплекса ГГМЗ. 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 воз-можностями выполнения аналогичных расчетов в разных (в том числе других) приложениях, сопоставления результатов.

В программном комплексе ГГМЗ реализованы следующие средства:

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

Примеры использования конструктора цифрового поля (КЦП). Программные модули этой группы обеспечивают в режиме интерактивной работы конструирование из типовых элементов с сопутствующей визуализацией математического описания (аналити-ческой функции) модели поверхности, интерпретируемой как рельеф - совокупность фрагментов разных форм поверхности. Конструиро-вание осуществляется в запрограммированном в системе *Mathemat-ica* модуле, включает составление уравнения поверхности - непре-рывной (или кусочно-непрерывной) определенной в прямоугольнике функции двух аргументов x и y . Пользователем задаются границы области определения $xMin$ и $xMax$, $yMin$ и $yMax$ и ограничения по-верхности по высоте $zMin$ и $zMax$. Заметим, что приведенные здесь и далее обозначения даются в формате InputForm (строковый форм-ат), 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 поддержи-вается. В комплексе ГГМЗ приведенные ниже выражения также ис-пользуются в пакете Surfer.

В комплекте (библиотеке) составных частей формируемой функции есть математические выражения (элементы), обеспечива-ющие воспроизведение участков поведения, характерных для релье-фа местности. Пользователь на первом этапе формирования эталонной поверхности составляет кусочно-заданную функцию $zBasic(x)$, базовый профиль - ленту заданной ширины и длины, ими-тирующую типы рельефа с элементами плато, склон, откос, обрыв. Простейший вариант определения функции и задания базового профиля записан в выражениях (1):

$$\begin{aligned}
 zBasic(x) = & \text{If}[xMin \leq x \leq xOtk1, fPlt(x, 0), 0] + \\
 & + \text{If}[xOtk1 < x \leq xOtk2, fOtk(x, 0), 0] + \\
 & + \text{If}[xOtk2 \leq x \leq xSkI2, fPlh(x, 0), 0] + \\
 & + \text{If}[xSkI2 \leq x \leq xMax, fSkI(x, 0), 0]; \\
 fPlt(x, y) = & zPlt; \quad fPlh(x, y) = \\
 = & fOtk(x, y) - \text{perkoef} \times (x - xOtk2)^2; \\
 fOtk(x, y) = & zPlt + \text{Tan}(ugOtk) \times (x - xOtk1); \\
 & zOtk2 = fOtk[xOtk2, 0]; \\
 fSkI(x, y) = & zSkI2 + \text{Tan}(ugSkI) \times (x - xSkI2); \\
 & zSkI2 = fPlh(xSkI2, 0).
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Затем базовая поверхность дополняется возмущениями разной формы, размеров и ориентации. Составление средствами КЦП базового профиля из фрагментов возможно с переходом «фрагмент - добавленный фрагмент» непрерывным образом, гладким переходо-м, скачком (имитация разлома). В случае непрерывного, гладкого переходов параметры склейки кусочно-заданной функции опреде-ляются автоматически программным модулем. Несколько разных примеров сформированных поверхностей приведены в [7, 8, 20].

На рис. 1 приведена иллюстрация, где в правой части показан 3D-график с применением градиентной раскраски (оттенки коричне-вого цвета) по уровню поверхности, и дополнительно сплошными желтыми линиями показаны 10 промежуточных линий-уровней (рав-номерная сетка по переменной z). Константы в выражении (1): $xMin=50.0$, $xMax=250.0$, $yMin=-0.0$, $yMax=160.0$, $zMin=0.0$, $zMax=10.0$, $xOtk1=110.0$, $xOtk2=170.0$, $xSkI2=190.0$, $zPlt=1.0$, $ugOtk=0.08$, $ugSkI=0.01$, $xOtk1$, $xOtk2$ – координаты точек перехода «плато – от-кос», «откос – пологий склон», $ugOtk$ и $ugSkI$ определяют наклон откоса и склона. В приведенном примере модель базовой поверхно-сти является квазитрехмерной (уровень z не зависит от y). Базовая поверхность (лента) составлена из 3-х типовых участков: плоский горизонтальный (плато), плоский быстрого возрастания уровня (от-кос), плоский медленного возрастания (пологий склон). Стыковка участков – непрерывно. Переход плато – откос осуществлен под заданным углом, переход откос – пологий склон осуществлен непре-рывным и гладким.

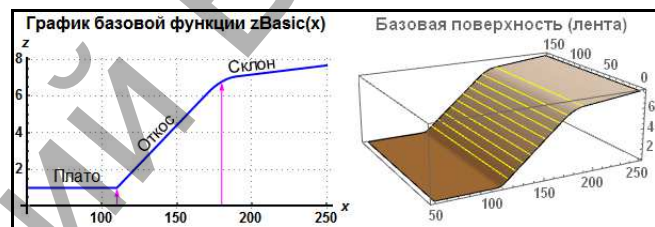


Рисунок 1 – График базовой поверхности. Профиль и 3D вид

Следующий этап конструирования – использование инструмен-тов программного модуля для дополнения базового профиля возму-щениями, фрагментами типовых элементов рельефа. Библиотека шаблонов включает элементы, которые соответствуют возмущениям (участкам искажений базовой поверхности) разной геометрической формы. Система *Mathematica* содержит большое количество про-странственных графических примитивов, из которых в КЦП исполь-зуются: конус, шар, цилиндр, кубоид, разные пирамиды. При под-ключении шаблонов предусмотрены возможности интерактивного задания их положения и размеров. Дополнительно, учитывая воз-можности формирования эталонной поверхности в других программ-ных пакетах и системах, в основной комплект включены математи-чески описываемые элементы - возмущения базовой поверхности. С достаточной для зрительного восприятия точностью они имитируют следующие формы рельефа: холм, насыпь, яма, выемка, траншея, канал, карьер, овраг, впадина. Отметим, что все перечисленные 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):

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

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 элементов типа траншея (с вертикальными стенками):

$$\begin{aligned}
 fTrench1(x, y) = & \begin{cases} -1, & -0.5 \leq x + k \times y \leq 0.5 \wedge -1 \leq y \leq 0.5 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \\
 fTrench2(x, y) = & \begin{cases} -1, & -0.5 \leq x \leq 0.5 \wedge -1 \leq y \leq 0.5 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

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 простейшие формы, которые задаются выражениями (4)

$$fPyramid1(x, y) = \begin{cases} 1 - \max(|x|, |y|), & |x| < 1 \wedge |y| < 1, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (4)$$

$$fPyramid2(x, y) = \begin{cases} \max(0, 1 - |x| - |y|), & |x| < 1 \wedge |y| < 1, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

Пример формирования модели эталонной поверхности $zSurfB$, полученной на основе базовой, дополнением типовыми элементами приведен на рис. 2. Выразительно просматриваются 2 пирамиды (ориентированы по-разному – с поворотом на 90°), 2 холма (разной высоты), яма, траншея, насыпь (ориентирована под углом к линиям изломов поверхности-основы). Показаны 3D-графики сформированной поверхности в двух разных ракурсах обзора, дополнительно в изображениях формы поверхности прорисованы характерные линии-уровни (сплошные желтые линии). Поверхности в обоих ракурсах выводятся с заданием уровня прозрачности 0.8, что позволяет видеть части заднего плана. Следует обратить внимание на то, что в КЦП элементы-возмущения автоматически «привязываются» к базовой поверхности на всех типах участков (плато, откос, склон).

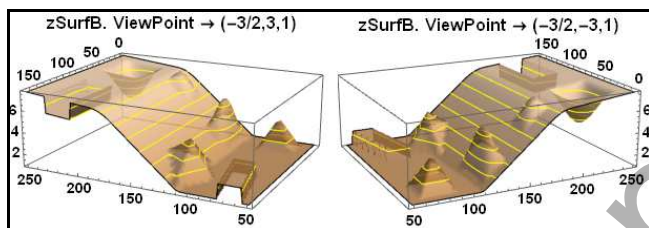


Рисунок 2 – Графики поверхности с типовыми элементами рельефа

Аналитическое выражение, описывающее сформированную и показанную на рис. 2 поверхность $zSurfB$, включает приведенные выше выражения (2)–(4); оно следующее:

$$zSurfB(x, y) = fOriginA(x, y) + 3 \times fPyramid2[0.05 \times (x - 115), 0.03 \times (y - 124)] + 3 \times fPyramid1[0.06 \times (x - 76), 0.07 \times (y - 24)] + 3.1 \times fHill[0.1 \times (x - 125), 0.04 \times (y - 32)] - 1.3 \times fTrench1[0.05 \times (x - 68), 0.02 \times (y - 150)] + 1.4 \times fHill[0.08 \times (x - 168), 0.08 \times (y - 30)] + 1.5 \times fTrench2[0.04 \times (x - 220), 0.02 \times (y - 144)] - 3 \times fOriginA(x, y) = zBasic(x), \quad k = 1/2. \quad (5)$$

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 [13, 15]).

На рис. 3 приведен пример формирования и визуализации модели второй эталонной поверхности $zSurfA$ с несколько другим размещением фрагментов-возмущений. По сравнению с $zSurfB$ изменены размеры двух элементов, поверхность $zSurfA$ приподнята на 2.8, уровень глубины ямы 5 заменен на 2.8, изменена ширина траншеи. Соответствующее аналитическое описание верхней поверхности задается выражением (6):

$$zSurfA(x, y) = fOriginA(x, y) + 2.8 + 2.5 \times fPyramid2[0.05 \times (x - 115), 0.03 \times (y - 124)] + 3 \times fPyramid1[0.06 \times (x - 76), 0.07 \times (y - 24)] + 2.8 \times fHill[0.1 \times (x - 125), 0.04 \times (y - 25)] - fTrench1[0.05 \times (x - 68), 0.02 \times (y - 150)] + 1.4 \times fHill[0.08 \times (x - 168), 0.08 \times (y - 30)] + 1.5 \times fTrench2[0.03 \times (x - 220), 0.02 \times (y - 144)] - 3 \times fHill[0.05 \times (x - 220), 0.04 \times (y - 36)]. \quad (6)$$

Важно, что по сравнению с выражением (5) в (6) изменены только коэффициенты. Также следует отметить, что приведенная иллюстрация – результат визуального воспроизведения формы поверхности $zSurfB$ (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, [15, 21]). Иллюстрации поверхностей $zSurfA$ и $zSurfB$ на рис. 3 можно интерпретировать как кровлю и подошву фрагмента пласта. Обе поверхности выводятся с разными настраиваемыми пользователем уровнями прозрачности (в данном примере для нижней 0.8, для верхней 0.4).

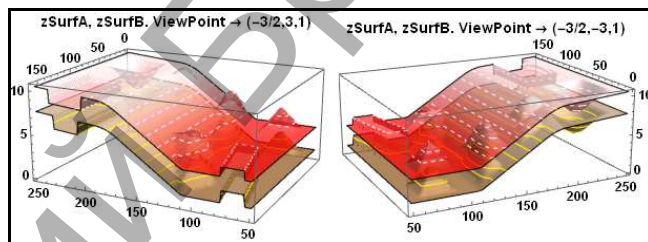


Рисунок 3 – Графики двух подобных поверхностей

Инструменты визуализации моделей. В комплексе ГГМЗ реализованы более десяти вариантов 1D, 2D и 3D графики, 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. Подробно возможности программных модулей этой группы описаны в [7, 8, 20]. Иллюстрации применения нескольких инструментов визуализации разрезов и отсечений даны ниже (рис. 4–6) на примере эталонных поверхностей, но все модули этой группы могут использоваться для любых уравнений поверхностей или цифровых описаний распределений, получаемых либо импортируемых в комплекс.

Варианты интерфейса визуализации распределений на профилях поясняют рис. 4, 5. В общем случае геологический профиль представляет собой графическое изображение в вертикальной плоскости строения недр, содержащихся в них залежей. В рассматриваемом случае профиль – линия, получаемая на пересечении анализируемой поверхности вертикальной плоскостью заданного направления. В варианте иллюстраций верхней части рис. 4 пользователь комплекса имеет возможность на схеме плана области моделирования (на фрагменте 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. При включении обработки двух поверхностей есть возможность сопоставления уровней, также можно визуализировать распределение уровня на двух профилях – фрагмент в правой верхней части рис. 4. Скриншоты в нижней части иллюстрируют другой вариант, обеспечиваемый соответствующим модулем ГГМЗ – способ задания координат начал и концов профилей. В таком варианте 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 плюсику. В примерах рис. 4 детализация вида формы поверхности осуществляется визуализацией с использованием 2D и 1D графики.

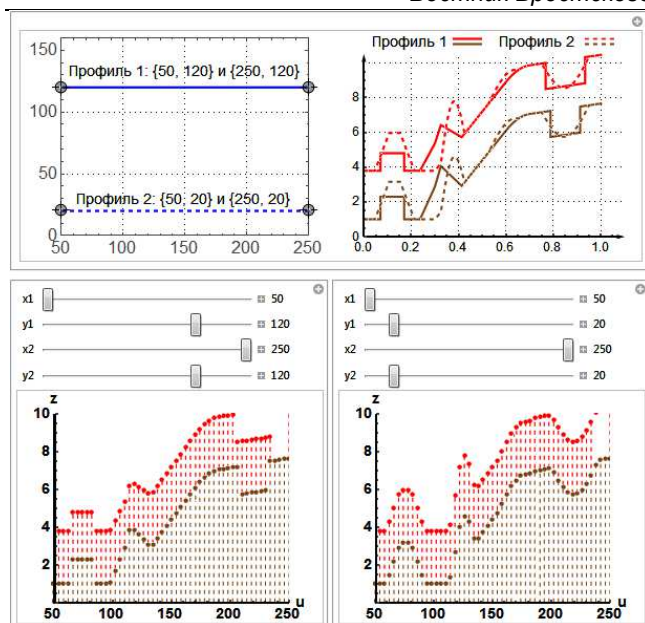


Рисунок 4 – Графики сечений. Примеры указания профилей локаторами, бегунками

На рис. 5 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, зеленая пунктирная) показывается на 3D графике поверхности, а в левой части окна выводится соответствующий профиль.

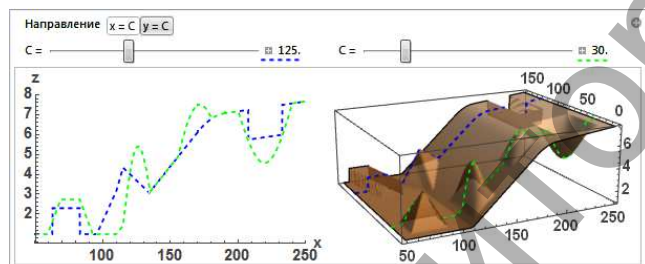


Рисунок 5 – Панель работы с профилем, вариант 3D и 1D графики

Визуализацию разрезов, сечений в ГМЗ обеспечивают интерактивные модули с панелями указания значений координат для 3D просмотра возможных разрезов (вертикальные, горизонтальные), отсечений (простые и сложные). Ниже на рис. 6 приведены скриншоты, иллюстрирующие вывод для 4 разных вариантов.

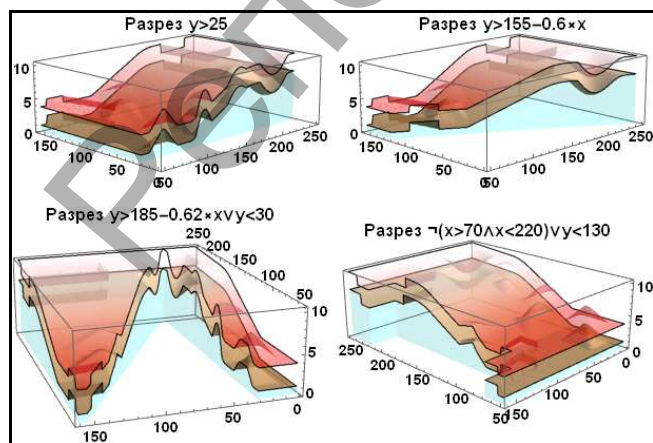


Рисунок 6 – Примеры вывода простых и сложных профильных разрезов

В верхней части рис. 6 показаны 2 фрагмента иллюстраций вывода простых профильных разрезов (получаются при одной вертикальной секущей плоскости). 2 фрагмента в нижней части рис. 6 – примеры вывода сложных профильных разрезов. Формулы задания секущих плоскостей приведены в заголовках графиков; для двух верхних графиков ракурс осмотра $(-3, -3, 1)$, для нижних графиков $(-3, 1, 1)$ и $(-2, 2, 1)$. Приведенные на иллюстрациях формулы задания разрезов могут быть полезны при работе (параллельно или отдельно) для сопоставления в других программных системах; в 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 [14, 15]. 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.

Моделирование предполагает аккумуляцию всей возможной и доступной информации. Например, для проектов разработки месторождений нефти – это данные дистанционных методов (сеймо-, грави- и магниторазведки), геофизических исследований скважин, анализы ядра, физико-химических свойств, результатов испытаний и т.п. Анализ исходных данных для геологических моделей – это трудно формализуемый процесс, он требует от специалистов не только знания разрешающих способностей и достоверности методов, но и понимания возможных технических особенностей получения информации. В большинстве случаев из-за ограниченной точности результатов дистанционных методов, различных подходов к геологической интерпретации и других причин можно получать разные варианты модели объекта. Поскольку в большинстве случаев требуемые для построения модели параметры могут быть достоверно определены лишь в некотором диапазоне значений, результат моделирования также имеет вероятностный характер. В практических условиях, например, сейсморазведочные прогнозы из-за разного рода погрешностей обычно оказываются неоднозначными, неустойчивыми. С другой стороны, направлением совершенствования технологии сейсмопрофилирования 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 разведки, проектирования системы сейсмопрофилей. Упомянуты и иллюстрируются средства генератора профиля наблюдения комплекса ГМЗ, 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 имеющуюся исходную информацию, предлагает на выбор несколько вариантов схем.

Ниже поясняются инструменты генератора профиля наблюдения, рекомендуемая для сопровождения такого анализа графика. Интерфейс построения или изменения схемы профилей наблюдения аналогичен заданию профильных разрезов – пользователь может перемещать отрезки локаторами, когда в фоне размещается изображение карты или плана области моделирования, или задавать начало и конец профиля, используя панели с бегунками. В любом варианте на плане (схеме) области определяются направления, на каждом фиксируются начальная и конечная точки профиля, а также число точек замеров (пикетов в случае сейсмопрофилей). Примеры показаны на рис. 7, 8. Отметим, что иллюстрации подготовлены не для того, чтобы показать лучший результат создания модели, а для пояснения шагов работы пользователя, инструментов ГМЗ. Другой существенный аспект – действия сопровождаются графикой, иллю-

стрируются фрагменты карт в изолиниях, то есть 2D графика, а не трехмерные виды, так как на 3D изображениях обсуждаемые детали мало различимы. Приведем этапы подготовки данных, используемых при получении аппроксимирующего цифрового поля, и поясним приведенные иллюстрации.

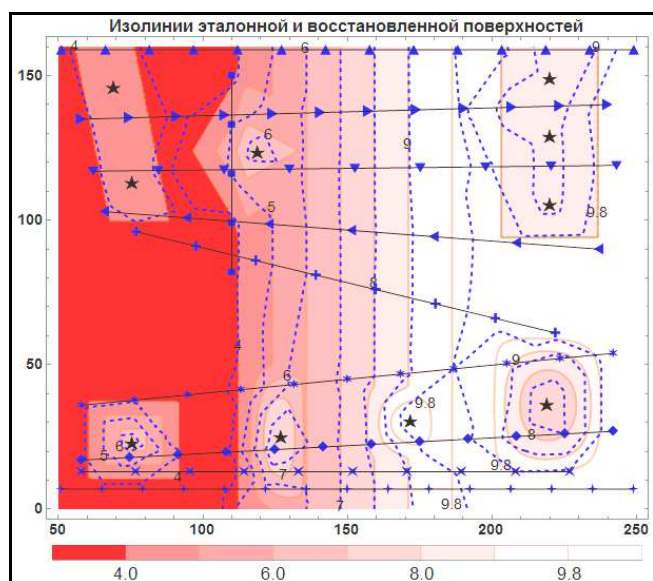


Рисунок 7 – Изолинии полей эталонного и восстановленного по 113 узлам

Пользователь, используя упомянутые выше интерактивные инструменты, рисует схему профилей, задавая на каждом из них число узлов. В отдельном программном модуле ГМЗ 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 уровня эталонной поверхности, но отдельно в ГМЗ есть инструменты «искажения результатов наблюдений» (на каждом отдельном профиле) наложением шумов с использованием наборов разных функций с осцилляциями и генераторов случайных чисел [17]. Затем, пользователь в доступном ему приложении по рассеянному множеству точек замеров, используя один из предпочтительных алгоритмов ([4, 22]), рассчитывает аппроксимирующее цифровое поле. Например, в [12] для интерполяции, экстраполяции предлагаются более пяти методов, каждый из которых включает дополнительные настройки. 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), Шенарда (Shepard's Method), радиальных базисных функций (Radial Basis Functions), геостатистический метод построения сети Крайгинга (Kriging). Можно использовать любой из этих методов, проводить сопоставление получаемых по разным алгоритмам результатов восстановления поверхности по данным в точках замеров. Сравнить результаты можно оценивая невязки; в сопоставляемых парах могут участвовать результаты расчетов по разным алгоритмам или по одному алгоритму, но с разными настройками; конечно же, можно рассчитывать невязку на эталонном цифровом поле.

На рис. 7–10 показаны результаты сопоставления эталонного цифрового поля и полей, восстановленных по двум разным множествам точек на профилях и 10 опорным точкам, которые идентифицируют позиции фрагментов-возмущений базовой поверхности. На рис. 7 показаны результаты сопоставления эталонного цифрового поля и восстановленного по множеству 113 точек, узлы показаны разными примитивами синего цвета, примитивы опорных точек фрагментов-возмущений – черные звездочки.

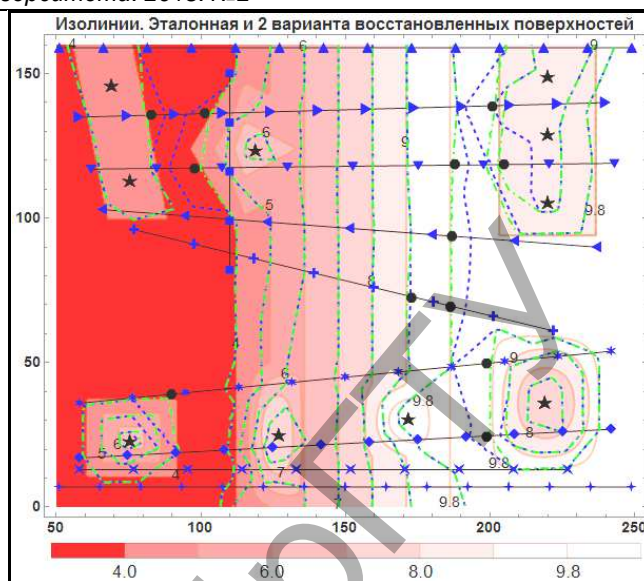


Рисунок 8 – Изолинии полей эталонного и восстановленных по 113 и 125 узлам

Схема профилей – одна из предложенных экспертом, которому была дана информация о форме базовой поверхности, положении фрагментов-возмущений (только опорные точки). Сплошными коричневыми линиями выведены 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 линиями показаны изолинии тех же уровней, но они получены для функции, сформированной в системе *Mathematica* методом интерполяции второго порядка на множестве упомянутых 113 точек. Контрольные точки фрагментов-возмущений также использованы при интерполяции. Пример дается для демонстрации инструментов ГМЗ и погрешностей, которые типичны при адаптации цифровых полей; выбран не лучший метод интерполяции.

Результаты работы предложенного и запрограммированного алгоритма адресного уплотнения сейсмических профилей из программного компонента «Адаптация» показаны на рис. 8. Узлы второй сети точек наблюдений, дополняющие первую (12 узлов), показаны черными примитивами (кружками). Следуя методу, новые узлы дополняют предыдущие, причем они размещаются на первоначальных профилях, новые направления дополнять не предусмотрено. Модуль комплекса, в котором реализован алгоритм метода адресного уплотнения, предлагает пользователю для принятия несколько вариантов, один из которых и приведен. На рис. 8 зелеными штрихпунктирными линиями показаны изолинии функции, сформированной в системе *Mathematica* тем же методом, как и в примере 113 точек, но уже по второму множеству точек с замерами – по 113 + 12 узлам. Сопоставление конфигураций изолиний показывает, что новое цифровое поле на участках, где добавлены новые узлы, заметно точнее воспроизводит эталонное.

По результатам на рис. 7 и 8 можно отметить, что исходная система профилей и количество узлов на них не обеспечивают высокой точности восстановления и воспроизведения оригинала. Но, если добавить априорную информацию, учитывающую особенности формы фрагментов-возмущений (компонент «Адаптация» содержит соответствующие инструменты), качество восстановления оригинала можно существенно повысить.

Отдельно отметим, что в комплексе есть инструменты оценки (в разных нормах) различий для любой пары любым способом восстановленных цифровых полей, а также погрешностей по эталонному распределению. Это можно делать на выбираемых участках (интегральные показатели) или локально с выводом карты плотности распределения абсолютной или относительной погрешности.

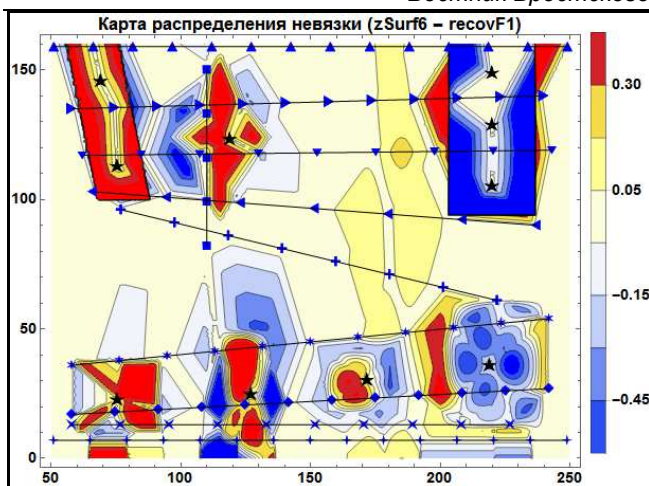


Рисунок 9 – Распределение невязки полей эталонного и восстановленных по 113 узлам

На рис. 9 и 10 показаны распределения невязки (абсолютной погрешности) обсуждаемых цифровых полей. На рис. 9 показано распределение абсолютной погрешности на эталоне цифрового поля, полученного по 113 узлам с отметками уровня. Справа от карты приведена легенда, принята цветовая схема "TemperatureMap", в которой падение отмечается в цветах оттенков синего, а рост (превышение) – в оттенках красного. Дополнительно пунктирными линиями отмечены уровни (изолинии) невязки -0,3, -0,15, -0,05, 0,05, 0,15, 0,3. Фрагменты (правый нижний угол полной площади) подобных карт приведены на рис. 10.

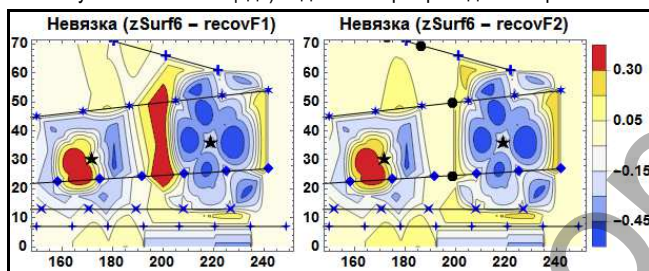


Рисунок 10 – Распределение невязки полей эталонного и восстановленных по 113, 125 узлам

Заключение. 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 ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Буйкис, А. А. О программном обеспечении вычислительного эксперимента в задачах неизотермической двухфазной многокомпонентной фильтрации / А.А. Буйкис, А.Б. Золотухин, В.Б. Таранчук // Прикладные задачи математической физики. – Рига: ЛГУ, 1985. – С. 191–205.
2. Барвенов, С. А. Методика, инструментарий адаптации математических моделей процессов подземной гидродинамики / С.А. Барвенов, М.Ф. Кибаш, В.Б. Таранчук // Выбранные научная работа БДУ, т. "Математика". – Минск, 2001. – С. 34–65.
3. Таранчук, В. Б. Интерактивная компьютерная система визуализации процессов переноса примесей в почвогрунтах "ГБД-п" / В.Б. Таранчук, В.В. Таранчук // Природопользование. – 2005. – Вып. 11. – С. 139–143.

4. Таранчук, В. Б. Построение цифровых геолого-экологических моделей в системе ГБД-э / В.Б. Таранчук // Геоэкология Беларуси / М.Г. Ясовеев [и др.] ; под ред. М.Г. Ясовеева, В.Б. Таранчука. – Минск : Право и экономика, 2006. Научное издание. – С. 72–96.
5. Булыгин, Д. В. Геология и имитация разработки залежей нефти / Д. В. Булыгин, В. Я. Булыгин. – М. : Недра, 1996. – 382 с.
6. Азиз, Х. Математическое моделирование пластовых систем / Х. Азиз, Э. Сеттари. – М. : Недра, 1982. – 408 с.
7. Таранчук, В. Б. Программный комплекс адаптации геологических моделей. Концепция, решения, примеры реализации / В.Б. Таранчук // Проблемы физики, математики и техники. – 2017. – № 3 (32). – С. 81–90.
8. Таранчук, В. Б. Интегрированный программный комплекс тестирования геологических моделей / В.Б. Таранчук // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. – 2017. – Том 43, № 16 (265). – С. 148–159.
9. WOLFRAM MATHEMATICA. Наиболее полная система для современных технических вычислений в мире [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.wolfram.com/mathematica>. – Дата доступа : 27.12.2017.
10. Таранчук, В. Б. Введение в язык Wolfram : учеб. материалы для студентов фак. прикладной математики и информатики спец. 1-31 03 04 «Информатика» / В.Б. Таранчук. – Минск : БГУ, 2015. – 51 с.
11. Таранчук, В.Б. Основы программирования на языке Wolfram : учеб. материалы для студентов фак. прикладной математики и информатики спец. 1-31 03 04 «Информатика» / В.Б. Таранчук. – Минск : БГУ, 2015. – 49 с.
12. EXPLORE THE DEPTHS OF YOUR DATA. SURFER [Electronic resource] // GOLDEN SOFTWARE. – Mode of access : <http://www.goldensoftware.com/products/surfer>. – Date of access : 27.12.2017.
13. Таранчук, В. Б. Особенности функционального программирования интерактивных графических приложений / В.Б. Таранчук // Вестник Самарского государственного университета. Естественнонаучная серия, раздел Математика. - 2015. - № 6 (128). – С. 178–189.
14. Таранчук, В. Б. О создании интерактивных образовательных ресурсов с использованием технологий Wolfram / В.Б. Таранчук // Информатизация образования. - 2014. - № 1 (73). - С. 78–89.
15. Таранчук, В.Б. Об использовании системы Mathematica при подготовке и распространении интерактивных графических приложений / В.Б. Таранчук, В.А. Куликович // Вестник БДПУ. Серия 3. – 2015. – № 2(84). – С. 58–64.
16. Халимов Э. М. Детальные геологические модели и трехмерное моделирование / Э.М. Халимов // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2012. – №3 (7). – С. 1–10.
17. Морозов, А.А. Программирование задач численного анализа в системе Mathematica : учеб. пособие / А.А. Морозов, В.Б. Таранчук. – Минск : БГПУ, 2005. – 145 с.
18. Таранчук, В. Б. О возможностях и инструментах реализации вероятностно-статистических методов в системе Mathematica / В.Б. Таранчук // Теория вероятностей, случайные процессы, математическая статистика и приложения : материалы Междунар. науч. конф., посвящ. 80-летию проф. д-ра физ.-мат. наук Г.А. Медведева, Минск, 23–26 февр. 2015 г. – Минск : РИВШ, 2015. – С. 320–325.
19. Таранчук, В. Б. Графический сервис вычислительного эксперимента : учеб.-метод. пособие / В.Б. Таранчук. – Минск : БГУ, 2009. – 124 с.
20. Taranchuk, V. The integrated program complex of the composer of geological models. Examples of results / V. Taranchuk, Viiktoriya Taranchuk // Computer Algebra Systems in Teaching and Research. – 2017. – Volume VI. – P. 195–203.
21. Taranchuk, V.B. Development of interactive teaching materials for computer mechanics. / V.B. Taranchuk, M.A. Zhuravkov // Vestnik BGU. Ser. 1, Fiz. Mat. Inform. – 2016. – No. 3. – P 97–107 (in Engl.).
22. Таранчук, В. Б. Математическое и программное обеспечение аппроксимации цифровых полей / В.Б. Таранчук // Теория вероятностей, случайные процессы, математическая статистика и приложения : сб. науч. ст. Междунар. науч. конф., Минск, 15–17 сент. 2008 г. – Минск : Изд. центр БГУ, 2008. – С. 326–334.

Материал поступил в редакцию 11.01.2018

TARANCHUK V.B. Methods and toolkit of an estimation of an accuracy of computer geological models

The article discusses the problems of development, tool filling, usages of the integrated program complex of the composer of digital geological and geoeological models. Examples illustrate advantages of an offered process engineering of selection and usage of components of the program complex by synthesis of units of computer algebra systems and geographical information systems. Possibilities of adapting of digital models, interactive graphics visualization, comparison of results are marked. Results of work of algorithm of address consolidation of the seismic profiles are presented, the resulted maps of isolines visually illustrate algorithm possibilities.