

Разработка Видов Отображения В Специализированных Системах Компьютерной Визуализации

В.Л. Авербух, А.Ю. Байдалин, Д.Ю. Горбашевский,
Д.Р. Исмагилов, Т.Р. Исмагилов, Р.М. Чернин
ИММ УрО РАН
Уральский Государственный Университет
г. Екатеринбург
averbukh@imm.uran.ru

АННОТАЦИЯ

В работе рассмотрены теоретические проблемы разработки специализированных систем визуализации. Приведены рекомендации по проектированию видов отображения для систем визуализации различного назначения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Компьютерная визуализация, специализированные системы визуализации, виды отображения.

ВВЕДЕНИЕ

В классическом определении под (компьютерной) визуализацией понимается методика перевода абстрактных представлений об объектах в геометрические образы, что дает возможность исследователю наблюдать результаты компьютерного моделирования явлений и процессов [16].

Традиционно выделяются следующие подобласти визуализации:

- научная визуализация;
- визуализация программного обеспечения;
- информационная визуализация.

В ходе разработки целого ряда специализированных систем научной, информационной визуализации и визуализации программного обеспечения установлено принципиальное единство методов представления и методов проектирования для визуализации различного назначения.

Визуализационный конвейер, задающий рамки проектирования и разработки систем визуализации (фильтрация/восполнение, мэппинг, рендеринг) должен быть дополнен в случае специализированных систем еще одним этапом проектирования - разработкой видов отображения. Наши исследования направлены на создание систематического подхода к разработке комплексных видов отображения для систем компьютерной визуализации.

Данная работа содержит некоторые теоретические результаты, полученные как в ходе наших исследований и разработок, так и на основании опубликованных в отечественной и зарубежной литературе материалов.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОНЯТИЙ СИСТЕМ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Опыт реализации специализированных систем визуализации позволяет перейти к некоторым обобщениям.

В литературе, в частности в [10], рассматриваются такие этапы получения результата в области численного (компьютерного) моделирования, как разработка физической

модели, разработка математической модели, алгоритмизация, программирование, вычисление по программе, визуализация, интерпретация и анализ результатов.

В связи с этими этапами можно говорить о физическом, математическом, алгоритмическом и программном уровнях вычислительной модели и, следовательно, о модельных объектах разного уровня или о физических, математических, алгоритмических и программных объектах. Рассмотрение визуализации в качестве самостоятельного этапа процесса моделирования позволяет ввести понятие визуальной модели и соответственно визуальных объектов (например, двумерных графиков, поверхностей, глифов и т.п.), служащих для представления модельных объектов различного уровня.

Вид отображения определим как абстракцию графического вывода, содержащую спецификацию визуальных объектов, их атрибутов, их взаиморасположения, возможной динамики и способов взаимодействия. При этом визуальные формы абстрактных данных не связаны ограничениями, накладываемыми определенными графическими системами.

Модельная сущность есть объект вычислительной модели, требующий изучения, чье состояние и поведение, свойства, атрибуты и особенности интересуют исследователя и, как следствие, подлежат визуализации.

Абстракция модельной сущности может быть определена через выделение следующих категорий:

- спецификации характеристик моделируемого явления, которые должны быть получены из имеющихся данных;
- требуемый качественный анализ модельного объекта и его свойств;
- семантические атрибуты модельного объекта.

Визуальное проектирование должно включать в себя учет знаний об абстракции модельных сущностей, обеспечивая тем самым основу для интерпретации различных аспектов модели. Основой визуального проектирования является проектирование видов отображения.

Абстракция визуализации подразумевает связывание модельных сущностей с видом отображения так, чтобы суть, поведение, особенности и атрибуты модельных сущностей могли быть представлены в конкретном графическом выводе, точно идентифицирующем все визуальные свойства, в которые переходят атрибуты соответствующего вида отображения [5].

Существует несколько способов спецификации графического вывода, которые определяют, как связываются данные о модельной сущности, ее атрибутах и элементах особого интереса с атрибутами и составляющими вида отображения при создании конкретного графического вывода. В случае научной и информационной визуализации чаще всего используются такие методы спецификации визуализации, как предопределение и ассоциация, тогда как в

визуализации программного обеспечения используются также декларативные методы спецификации и (редко) спецификация путем демонстраций, которая предполагает описание визуализации посредством представления системе образов вводимой и выводимой информации.

Метод предопределения предусматривает предварительное определение видов отображения разработчиками системы. Этот метод спецификации характерен для систем визуализации конкретных приложений с жестко фиксированным и весьма ограниченным набором видов отображения. Однако, несмотря на эти ограничения, применение методов предопределения обеспечивает преимущества, связанные как с скоростью работы, так и с хорошим соответствием специализированного вида визуализации конкретному приложению.

Ассоциативный подход к спецификации вывода заключается в установлении соответствия между определенным состоянием модельной сущности и/или ее атрибутами и графическими и/или неграфическими атрибутами вида отображения. Каждое изменение указанного состояния, например, значения переменной, влечет автоматическое изменение соответствующего изображения. Ассоциация обеспечивается либо вызовом процедур визуализации, либо за счет специальных "визуальных мониторов", отслеживающих события в моделирующей программе, ведущие к изменению состояния модельных сущностей и передающие информацию о них в изменяемые визуальные объекты.

Декларативный подход к спецификации визуализации является расширением ассоциативного. Аналогично описывается отображение состояния программы на графический образ и обеспечивается его изменение в соответствии с изменением состояния программы. Однако, при декларативном подходе произвольное утверждение, касающееся состояния программы, может быть представлено в визуальном виде. Возможно такое описание согласования отношений между объектами, когда система отслеживает эти согласования, изменяя представления одного объекта при изменении другого [14].

Для правильного и эффективного визуального представления необходимо описание модельной сущности как в плане того, какой именно объект подлежит изучению, так и в плане описания этого объекта на уровне компьютерной реализации. То есть следует получить качественное, аналитическое и компьютерное (в том числе программное) описание того, что надо визуализировать. Необходимо также четко уяснить какие именно состояния и особенности данного объекта нас интересуют, так как представление особенностей, состояний и смены состояний и есть одна из основных задач визуализации. Важны также ответы на следующие вопросы - какими графическими и неграфическими средствами сам объект, его атрибуты и особенности можно и нужно представить, как следует визуально выделить элементы особого интереса (интересные объекты) данной модельной сущности.

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

При анализе средств визуализации следует различать примеры визуализации и системы визуализации.

Системы визуализации могут иметь дело с произвольными модельными объектами из некоторого определенного класса. Примеры визуализации являются или сделанной вручную демонстрацией, или достаточно гибкой визуализацией особенностей некоторого модельного объекта. При этом следует отметить, что система визуализации может быть проще мощного примера, как по использованным графическим средствам, так и по визуальной выразительности.

Системы визуализации можно подразделять по охвату (широте области применения) от систем общего или широкого назначения до узкоспециализированных систем.

Системы общего назначения содержат некоторый достаточно богатый набор видов отображения (например, двумерные и трехмерные графики, изолинии и изоповерхности, векторные поля), служащих для представления широкого класса модельных объектов. Во многих случаях они могут рассматриваться как инструмент для создания примеров или специализированных систем визуализации.

Проектирование и разработка универсальных, обладающих богатыми функциональными возможностями систем визуализации требует очень больших ресурсов. Как правило, разработка специализированных систем намного проще и дешевле, хотя существуют примеры специализированных систем [11], [12], которые по методикам визуализации и сложности реализации намного превосходят многие системы общего назначения.

Разработка специализированных систем оправдана не только в случаях сверхпроектов компьютерного моделирования, когда для решения конкретной задачи разрабатывается специальная суперЭВМ, мощная рабочая станция с аппаратной поддержкой трехмерной графики и параллеливаются все стадии визуализационного конвейера [12]. Необходимость разработки специализированных систем вызвана, в частности, тем, что на определенных этапах процесса компьютерного моделирования появляются новые, ранее неизвестные, модельные объекты, имеющие абстрактную природу, например, многомерные непрерывные множества решений или дискретные информационные множества. Визуализация этих объектов при помощи универсальных систем часто приводит к потерям именно тех особенностей, которые и интересуют пользователей, так как традиционно используемые визуализационные методы не приспособлены к их отображению. В то же время использование специализированных систем обеспечивает более глубокое изучение новых модельных объектов и позволяет наращивать визуализационные возможности на следующих этапах компьютерного моделирования. Кроме того, использование систем общего назначения требует от пользователя больших усилий, как по разработке видов отображения, так и по созданию соответствующих им графических образов и методов взаимодействия.

При рассмотрении специализированных систем следует обратить внимание на две функции визуализации - иллюстративную и когнитивную (способствующую мышлению) [8]. Когнитивная функция, связанная с представлением научных абстракций, способствует получению новых знаний о данной предметной области. Именно когнитивная функция выходит на первый план при визуализации модельных объектов, чья структура и

особенности в принципе неизвестны, особенно на этапе разработки модели, когда не до конца ясны и алгоритмы, и методы их реализации, а зачастую и сами физические (биологические, информационные и т.п.) и математические модели. Для отображения особенностей изучаемых модельных объектов, для интерпретации результатов моделирования могут оказаться необходимыми новые, комплексные или нетрадиционные для данного случая виды отображения, которые не поддерживаются универсальными системами визуализации.

Таким образом, когнитивная визуализация характерна при изучении объектов, имеющих неизвестную и/или абстрактную природу, а также для начальных этапов компьютерного моделирования. Тогда как иллюстративная визуализация характерна для завершенных компьютерных моделей и служит для демонстрации устойчиво получаемых результатов моделирования. Задачи когнитивной визуализации естественно требуют разработки специализированных систем, реализующих новые метафоры визуализации и взаимодействия и новые виды отображения.

Пользователь специализированных систем компьютерной визуализации выступает в двух ролях.

Во-первых, он является основным экспертом на всех этапах проектирования и разработки. Пользователь вместе с разработчиком выбирает "объекты особого интереса". Разработчик именно от пользователя узнает, как тот "видит" объекты компьютерной модели, чтобы найти метафоры визуализации и спроектировать виды отображения. Знания пользователя о специфических особенностях компьютерных моделей и реализующих их счетных алгоритмах позволяют разработать эвристические методики восстановления или фильтрации, необходимые для построения информативных графических образов. Наконец, пользователь осуществляет приемку и опытную эксплуатацию системы визуализации и определяет, как она должна развиваться в дальнейшем.

Во-вторых, пользователь в процессе взаимодействия с системой визуализации осуществляет анализ и интерпретацию генерируемых графических образов и является, тем самым, конечным потребителем "визуальной продукции" [1], [5]. В этой связи необходима разработка модели пользователя, понимаемой в данном случае, как набор основных личностных и профессиональных характеристик, например, таких как психофизиологические свойства и эмоциональные особенности, общие, специальные и компьютерные знания, опыт работы с вычислительными и/или визуальными системами, стимулы и мотивации, профессиональная культура.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВИДОВ ОТОБРАЖЕНИЯ

Теперь на базе примеров специализированных систем, в основном разработанных в нашем коллективе, рассмотрим некоторые рекомендации, полезные при проектировании видов отображения.

Проектирование видов отображения необходимо начинать совместно с будущими пользователями анализа компьютерной модели, анализа и описания прикладной области, а также с изучения самого пользователя и выявления того, как он может и хочет взаимодействовать с визуальными представлениями модельных объектов.

Как уже неоднократно указывалось, описание прикладной области включает в себя осознание того, какие модельные объекты, их особенности и состояния подлежат визуализации, какие события, происшедшие с объектом приводят к смене состояний визуальных образов. Выявление модельных сущностей, анализ их особенностей, состояний и потенциальных событий в процесс их функционирования являются основа первого этапа описания прикладной области при визуализации. Далее необходимо выявление естественной или квазиестественной образности, присущей данной прикладной области. Для тех прикладных областей, где нет естественной образности, надо искать искусственные визуальные знаковые системы.

Анализ прикладной области и построение модели пользователя способствуют генерации соответствующей метафоры визуализации, на базе которой создается язык визуализации, реализуемый в виде набора обобщенных видов отображения.

Метафора в данном случае понимается, как основная идея уподобления сущностей прикладной области и визуальных объектов, как отображение, ставящее в соответствие понятиям и объектам моделируемой прикладной области систему сближений и аналогий, порождающую некоторый изобразительный ряд (набор видов отображения) и набор методов взаимодействия с визуальными объектами [1]. При этом вовсе не обязательно заимствовать эти идеи только лишь из повседневного опыта проектировщика. Так, опыт реализации средств визуализации для системы параллельного программирования DVM [9] показал, что переработка методов информационной визуализации дает хороший эффект в системах визуализации данных о производительности параллельных систем [2].

Поиск подходящей для пользователя метафоры может потребовать значительных усилий от обеих сторон процесса разработки. Особенно сложно найти метафору визуализации и соответствующую систему видов отображения в тех случаях, когда для данной прикладной области не удается подобрать естественную или привычную образность, тем более, когда она вообще отсутствует.

В [7] описывается визуализация четырехмерного информационного множества, являющегося результатом моделирования протекания некоторой химической реакции. (Размер одного информационного множества составляет порядка 1 млн. точек. Без визуализации анализ и интерпретация результатов едва ли выполнимы.) Очевидно, что не существует естественной образности для многомерных множеств. В литературе описаны некоторые приемы представления четырехмерных множеств, однако, все они оказались неприемлемы для данного случая. После длительного анализа структуры множеств, целей моделирования и опыта представления многомерных объектов был предложен ряд методик визуализации четырехмерных множеств, среди которых были выбраны приоритетные виды отображения. Успех в данном случае связан с возможностью разделения координат четырехмерной точки на две сравнительно независимые пары, таким образом, что можно построить связанные между собой наборы видов отображения, представляющих двумерные и трехмерные проекции четырехмерного множества. Для лучшей интерпретации вводится специальный визуальный объект, так называемый, росток точки, связанный с представлением двумерных сечений множества, где секущая гиперплоскость

задается с помощью выбора точек из двумерной проекции. Пользователь в интерактивном режиме выбирает одну точку проекции и наблюдает строение ее ростка, тем самым получая возможность визуально оценить его конфигурацию.

На основании этого можно говорить о таком приеме визуализации, как создание специальных визуальных объектов, не имеющих соответствия среди модельных объектов, но обеспечивающих их анализ и интерпретацию.

В работах [5-6] описаны система визуализации построения максимальных стабильных мостов в линейных дифференциальных играх. Решения представляются в виде трубок, которые соответствует определенному значению цены игры. Трубка задается набором параллельных двумерных многоугольных сечений. Средства визуализации отдельных мостов или системы мостов должны дать информацию об устройстве функции цены и ее особенностях. Одним из видов отображения системы является восстановленная с помощью триангуляции по контурам сечений поверхность. Разработанный алгоритм триангуляции позволяет за счет увеличения соответствующего угла подчеркивать негладкость поверхности трубки, представляющую особенности функции цены игры.

Таким образом, в этом случае было использовано визуальное утрирование особенностей для их быстрого опознания.

Большую роль в построении видов отображения играет поиск необходимой перспективы наблюдения, в которой необходимо строить визуальные объекты для их лучшего изучения. Необходим выбор системы координат, подбор ракурсов, типов освещения и пр. Может, например, оказаться полезным представление двумерной информации в трехмерном виде. Следует однако, избегать возникновения артефактов визуализации и перспективы.

В работе [5] описан метод построения графика функции цены дифференциальной игры в виде поверхности в трехмерном пространстве. Способ изображения ориентирован на случай, когда информация о функции цены поступает в виде набора фронтов - линий уровня функции цены, просчитанных с определенным шагом по времени. В ходе визуализации на основании двумерных ломаных, заданных своими вершинами, восстанавливается (на основе некоторых знаний о природе функции цены игры) поверхность. При этом алгоритм позволяет выделять места, где нарушается гладкость и непрерывность графика функции цены.

Другой вариант выбора перспективы был использован при визуализации моделирования одного из физических процессов. В данной модели имеет место огромный разброс числовых данных, который при визуализации приводит к значительному искажению вида поверхности. При этом в обычных координатах видны либо мелкие детали (порядка $10E-4$), либо крупные (порядка $10E+4$). Проблема совмещения на одном графике небольших (фоновых) значений и очень больших всплесков была решена с помощью часто применяемых в физике логарифмических преобразований, которые не искажают в сильной мере вида поверхности и дают хорошее представление о всем процессе в целом, то есть о его фоновых значениях и всех всплесках.

Наиболее приятный для проектировщика вариант возникает, когда при компьютерном моделировании можно использовать естественную образность физической модели. Классическим примером этого является специализированная

система "виртуальная аэродинамическая труба" [11], служащая, в частности, для визуализации компьютерного моделирования космического челнока. Однако использование естественной образности не избавляет от необходимости поиска специальных методик визуализации.

Например, в системе визуализации кинетики размножения и мутации вирусов необходимо по ходу одного анимационного фильма показать рост популяции вирусов от десятков и сотен особей до десятков и сотен тысяч объектов. Для решения используются приемы, заимствованные из кинематографа, такие как панорамирование, смена планов, наплыв. Кроме этого применяется имитация динамики роста в случае очень большого числа вирусов за счет колебания сплошной массы. Наряду с использованием естественной образности и кинематографических приемов используются привычные для исследователя графики и таблицы.

Вообще, в настоящее время при проектировании систем визуализации рекомендуется применение множественности видов отображения, показывающих разные аспекты изучаемого процесса с использованием различных перспектив и методик визуализации [15].

Во многих случаях следует говорить уже не только о проектировании набора последовательно или одновременно выводимых видов отображения, но о системе связанных друг с другом видов отображения, использующих в единстве и взаимодействии графику, анимацию, таблицы [4] [7] [2]. В этой связи отметим, что возможные способы взаимодействия с визуальными объектами должны проектироваться как часть комплексного вида отображения.

Как правило, в системах визуализации реализуются методы непосредственного манипулирования с визуальными объектами, находящимися в основном окне вывода. Однако при насыщении основного вида отображения дополнительной информацией, например, линиями уровня, наложенными на поверхность, манипуляции с визуальными объектами (изменение положения и ориентации объекта в трехмерном пространстве, масштаба вывода изображения и пр.) становятся затруднительными. В разработанной нами системе визуализации моделирования загрязнения окружающей среды было предложено использовать для таких действий специальное окно, упрощенно повторяющее основное. В дополнительном окне проводятся манипуляции, немедленно отображающиеся на основном изображении.

Как следствие единства методов визуализации различного назначения имеет место перенос методик представления, дрейф видов отображения между различными областями компьютерной визуализации. Например, методы визуализации и виды отображения переходят из систем научной визуализации в информационные визуальные системы, а из информационной визуализации в системы визуализации производительности параллельных систем. Одновременно с этим в компьютерную визуализацию приходят методы, первоначально получившие распространение в компьютерных развлечениях и играх. Так, в конце 80-ых годов методы виртуальной реальности (аппаратура для которой, в свою очередь, заимствована из арсенала обучения летчиков и астронавтов) были использованы в шоу-бизнесе. Затем, в 90-ых началось их активное использование в научной визуализации, а следом в системах информационной визуализации. Тогда же в конце 80-ых, начале 90-ых годов были разработаны системы визуальной отладки производительности параллельных

систем, в которых методы, ранее применяемые в статистической графике, были использованы при разработке видов отображения для данных о производительности параллельных программ.

В разрабатываемом визуализаторе системы параллельного программирования DVM [9], [2] дрейф методик визуализации и видов отображения особенно заметен. Так, "информационная стена", активно применяемая в информационной визуализации была преобразована в вид отображения "стена интервалов", представляющий собой набор столбчатых диаграмм, описывающих основные единицы отладочной информации в DVM. В системах информационной визуализации, построенных на базе методик виртуальной реальности, активно используется прием входа в помещение, в котором находится нужная информация [4]. Аналогично этому в визуализаторе DVM строится методика получения дополнительной информации за счет виртуального "входа" в один из блоков стены интервалов.

Вообще, идея виртуальной замкнутой комнаты активно применяется как в компьютерных играх, так и в системах информационной визуализации и визуализации данных о производительности параллельных программ [13]. В визуализаторе DVM на базе этой идеи строятся методики поддержки проектирования DVM-программ.

Вместе с тем расчет на использование аналогий и заимствование методов отображения не всегда оправдан. Многие виды отображения разработаны для конкретного случая и не переносятся в системы, реализуемые для других задач и других пользователей. Методы представления многомерных дискретных данных, полно описанные, в частности, в [15], оказались неприменимы для отображения многомерных медицинских данных [4].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении еще раз сформулируем приемы построения видов отображения в специализированных системах компьютерной визуализации:

- качественное, аналитическое и компьютерное (в том числе программное) описание вычислительной модели;
- поиск основных сущностей, выделение особенностей, состояний и изменений состояний,
- выбор или построение метафоры визуализации;
- визуальное утрирование особенностей за счет зависимых от данного случая знаний о физической (биологической информационной и т.п.) и/или математической сущности данных;
- выбор необходимой перспективы наблюдения, в которой необходимо строить графический вывод;
- построение специальных визуальных объектов, не имеющих соответствия среди модельных объектов, но обеспечивающих их анализ и интерпретацию;
- применение множественности видов отображения, показывающих разные аспекты изучаемого явления, создание систем видов отображения, включающих графику, анимацию, табличные и текстовые представления, а также управление выводом за счет непосредственного манипулирования визуальными объектами;

- использование при построении видов отображения естественной и привычной образности, а также аналогов и "дрейфующих" видов отображения;
- применение в системах визуализации различного назначения новых методик визуализации, в частности методик виртуальной реальности.

Отметим, что в проблематике построения видов отображения существуют нерешенные проблемы, среди которых следует обратить особое внимание на проблемы обеспечения адекватности визуализации, проблемы, связанные с пользователями и интерпретацией ими визуальных образов. Для этого по нашему мнению необходимы дополнительные исследования в области моделирования пользователя.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты № 01-07-90210, № 01-07-90215.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авербух В.Л. Метафоры визуализации // Программирование. 2001. № 5. С. 3-17.
2. Авербух В.Л., Байдалин А.Ю. Проектирование средств визуализации отладки производительности для системы параллельного программирования DVM // Алгоритмы и программные средства параллельных вычислений. УрО РАН, 2001 Вып. 5., 2001 С. 3-40.
3. Авербух В.Л., Гребенникова И.В., Кузеванова О.В. Экспериментальная визуальная информационная система, использующая элементы виртуальной реальности // Науч. сервис в сети Интернет: Тез. докл. Всерос. науч. конф. (Новороссийск, 2000). М. Изд-во МГУ, 2000. С. 24-26.
4. Авербух В.Л. Гребенникова И.В., Кузеванова О.В., Рябинина Л.Б. Информационная визуализация для медицинских приложений // Мат. методы в медицине и биологии \ Материалы 3 Урал. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 11 мая 2001 г. Екатеринбург, УрМА, 2001, с. 15-17.
5. Авербух В.Л., Зенков А.И., Исмагилов Т.Р., Манаков Д.В., Пыхтеев О.А., Юртаев Д.А. Разработка специализированных систем научной визуализации // Алгоритмы и програм. средства парал. вычислений: Сб. науч. тр. / ИММ УрО РАН. Вып. 4, Екатеринбург, 2000, С.3-23.
6. Авербух В.Л., Юртаев Д.А. Методика разработки специализированных систем визуализации на примере задачи построения мостов в линейных дифференциальных играх // Алгоритмы и программные средства параллельных вычислений, Выпуск 2, Екатеринбург, ИММ УрО РАН., 1998, стр. 3-9.
7. Васев П.А., Перевалов Д.С. Один метод визуализации 4-х мерных множеств // Материалы Всероссийской научной конференции "Суперкомпьютерные вычислительно-информационные технологии в физических и химических исследованиях" \ Черноголовка 31 октября - 2 ноября 2001 года. Черноголовка. Подмосковный филиал МГУ им. М.В.Ломоносова, Институт Проблем Химической Физики РАН, 2001, с. 32-36.

8. Зенкин А.А. Когнитивная компьютерная графика. М. Наука. 1991.
9. Коновалов Н., Крюков В. Параллельные программы для вычислительных кластеров и сетей // Открытые системы. 2002. N 3. С.12-18.
10. Самарский А.А. Математическое моделирование и вычислительный эксперимент // Вестник АН СССР 1979, N 5. Стр. 38-49.
11. Bryson S., Levit C. The Virtual Wind Tunnel // IEEE Computer Graphics and Applications, July 1992.
12. Heermann Ph. D. Production Visualization for the ASCI One TeraFLOPS Machine // Proceedings of the 9th Annual IEEE Conference on Visualization (VIS-98), Oct 18-23 1998, ACM Press, New York, 1998, pp. 459-482.
13. Reed D., Scullin W., Tavera L., Shields K., Elford Ch. Virtual Reality and Parallel Systems Performance Analysis // IEEE Computer, V.28, N 11, (November 1995) pp. 57-67.
14. Roman G.-C., Cox K.C., Wilcox C.D., Plun J.Y. Pavane: a System for Declarative Visualization of Concurrent Computations // Journal of Visual Languages and Computing. (1992), 3, pp. 161-193.
15. Spence R. Information Visualization. L. Addison-Wesley, 2001.
16. Visualization in Scientific Computing, Special Issue, ACM SIGGRAPH Computer Graphics, V. 21, N 6, November 1987.