

Разработка средств компьютерной визуализации для научных исследований

В.Л. Авербух
ИММ УрО РАН, УрГУ
г. Екатеринбург

1. Введение

Визуализация является существенной частью процесса численного моделирования, обеспечивающей анализ и правильную интерпретацию результатов вычислений, а также дальнейшую работу с вычислительной моделью. Можно выделить три основных аспекта проектирования и разработки систем компьютерной визуализации. Прежде всего, это проблематика, связанная с созданием, хранением, обработкой и выводом изображений с помощью ЭВМ, то есть непосредственно с машинной (компьютерной) графикой. Вторым аспектом является проблема инженерии программного обеспечения, общих для многих приложений. Наконец, третий аспект связан с проблемами, относящимися к восприятию и интерпретации визуальных образов пользователем системы. Наши исследования посвящены именно этим аспектам проектирования.

История развития компьютерного моделирования выявляет целый ряд проблем, возникающих в связи с особенностями человека, разработчика и/или пользователя аппаратно-программных комплексов, аналитика и интерпретатора чудовищно больших объемов данных, сгенерированных современными “мельницами чисел”. Именно человек должен находиться во главе угла при проектировании систем человеко-машинного взаимодействия и визуализации. В случае компьютерной визуализации, этот подход заключается в разработке специализированных и персонализированных систем различного назначения и соответственно в рассмотрении вопросов, связанных с изучением человеческого фактора в проектировании систем компьютерной визуализации различного назначения. Предложенная нами методика проектирования этих систем, в первую очередь, касается именно прагматики визуализации, а не техники их реализации.

При описании компьютерной визуализации как самостоятельной дисциплины, входящей в состав Вычислительных Наук отметим, что в литературе представлены различные точки зрения на определение визуализации и понимание её места в ряду других дисциплин. Традиционный подход выделяет, прежде всего, процесс формирования в мозгу зрительных образов и интерпретацию явлений на визуальном языке. Современный, связанный с ЭВМ подход к определению визуализации описывает ее, прежде всего, как инструмент или метод интерпретации введенных в ЭВМ графических данных и генерации образов на основе сложных многомерных наборов данных. Визуализация с одной стороны представляется связанной с мышлением человека и с интерпретацией им сложных данных, а с другой с современными вычислениями (computing) и использованием ЭВМ для моделирования в науке, технике, экономике и пр.

Очевидно, что визуализация, понимаемая как зримое представление ментальных моделей, существовала задолго до появления современной вычислительной техники. Более того, визуализацию, то есть перевод данных и информации в некоторые графические образы, можно рассматривать как составную часть нашей повседневной жизни. После создания первых ЭВМ под визуализацией результатов счета понимался любой вывод цифр или символов на ленту примитивного печатающего устройства, лист АЦПУ или экран дисплея. Постепенно под визуализацией стал пониматься лишь графический вывод, вывод двумерных графиков или трехмерных поверхностей.

Публикация доклада “Визуализация в научных вычислениях” в ноябрьском номере журнала ACM SIGGRAPH Computer Graphics за 1987 год [1] положила начало новой эре в истории компьютерной визуализации.

2. Визуализация и процесс компьютерного моделирования

В западной литературе (например, в [2]) описан цикл компьютерного моделирования, состоящий из трех основных стадий:

- подготовка к анализу,
- вычисления,
- визуализация и анализ результатов.

В отечественной литературе (в частности, в [3]) этот цикл рассматривается более подробно. Он известен как схема численного моделирования или схема численного эксперимента и в полном виде предусматривает следующие стадии:

- сбор и накопление первичных данных;
- разработка физической модели;
- разработка математической модели;
- алгоритмизация;
- программирование;
- вычисление по программе;
- визуализация;
- интерпретация и анализ результатов.

Таким образом определено место визуализации в цикле моделирования - визуализация, представляя результаты вычислений, обеспечивает интерпретацию и анализ полученных данных.

Итак, под компьютерной визуализацией мы понимаем методику перевода абстрактных представлений об объектах в геометрические образы, что дает возможность исследователю наблюдать результаты компьютерного моделирования явлений и процессов [1]. При этом мы считаем, что алгоритмические и программные методики генерации изображения относятся непосредственно к машинной графике.

Выделяются три подобласти компьютерной визуализации:

- **научная визуализация** (визуализация результатов научных вычислений);
- **визуализация программного обеспечения** (использование графики для уяснения понятий и эффективной эксплуатации программного обеспечения и спецификации программ в процессе их разработки);
- **информационная визуализация** (визуальное описание и представление, как правило, абстрактной информации, получаемой в процессе сбора и обработки данных различного назначения) [4].

Разделение на подобласти происходит по различным направлениям и задачам приложений визуализации. Однако имеет место глубокое единство всех ее подразделов как по методикам построения видов отображения (вплоть до методик рендеринга), так и по конечным целям и задачам - обеспечению интерпретации и анализа результатов компьютерного моделирования.

Кроме того, можно выделить три функции визуализации – *иллюстративную, коммуникативную, когнитивную*. Эти же функции присущи и традиционной, “бескомпьютерной” (или “докомпьютерной”) визуализации, которая понимается обычно, как процесс формирования зрительных образов для объектов, не имеющих зримых форм, или, как интерпретация явлений на визуальном языке.

Анализ примеров функционирования как традиционной, так и компьютерной визуализации показывает, что визуализация может быть полностью описана, как знаковый процесс, а в качестве ее оснований могут быть положены элементы понятийного аппарата семиотики, науки о функционировании знаковых систем.

Предпосылки формирования дисциплины “компьютерная визуализация” в середине 80-ых годов описываются тремя пунктами:

- интеллектуальные предпосылки, то есть наличие богатой традиции визуальных методов представления данных;

- потребности, возникшие в связи с появлением суперЭВМ и необходимостью анализа и интерпретации огромных объемов данных;
- техническая возможность, основанная на создании мощных аппаратных и программных средств машинной графики.

При определении предмета дисциплины необходимо осознать проблемы, которые стоят перед ее исследователями. В докладе [1] было сказано, что “визуализация есть способ увидеть невидимое”. Авторы учебного пособия [5], перефразируя известное высказывание Р. Хэминга (“цель вычислений - понимание (инсайт), а не числа”) для случая визуализации, сформулировали следующее: “цель визуализации - понимание (инсайт), а не картинка”.

С нашей точки зрения главная задача компьютерной визуализации - это создание методов визуального представления основных сущностей вычислительных моделей для полноценной интерпретации результатов моделирования. Цель визуализации - обеспечить интерпретацию, а картинка (правильнее обобщенный вид отображения) является средством этого.

Важной задачей компьютерной визуализации является изучение методов создания видов отображения для конкретных компьютерных моделей. При проектировании систем визуализации необходимо:

- Выделить, что надо показывать;
- Определить то, как это должно выглядеть;
- Решить, каким образом, при помощи каких методик машинной графики сгенерировать изображения.

Необходимо изучение модельных объектов, их особенностей, событий особого интереса, и т.п. Далее нужен поиск и/или построения видов отображения, адекватных проблеме и мышлению пользователей. Кроме стандартных требований к алгоритмам машинной графики (скорость работы, уровень реализма и т.п.) важно, чтобы они могли сами находить интересные особенности в данных, описывающих математические объекты, а затем на них могло бы концентрироваться внимание пользователей.

В основе концепции визуализации лежит идея о том, что наблюдатель может формировать ментальную модель, визуальные атрибуты которой представляют атрибуты данных определенным способом. Отсюда следует несколько вопросов:

Какие ментальные модели наиболее эффективно передают различные виды информации?

Какие определяемые и распознаваемые визуальные атрибуты этих моделей наиболее полезны для передачи специфической информации как самостоятельно, так и вместе с другими атрибутами?

Как наиболее эффективно порождать выбранные ментальные модели в мозгу наблюдателя?

Как обеспечить “ручное” или автоматическое проектирование видов отображения, соответствующих выбранным моделям и их атрибутам [6].

Проблема эффективности интерпретации очень важна для проектировщика систем визуализации, также как и вся проблематика, порождаемая ролью пользователя, и как потребителя результатов процесса моделирования, и как участника этого процесса.

Отметим, что зачастую визуализация несколько упрощенно понимается лишь как непосредственное отображение трехмерных образов (рендеринг) на некоторую плоскость вывода или даже как набор визуальных и иконических интерактивных методов. Эти важные вопросы следует скорее отнести к проблематике компьютерной графики и человеко-машинного взаимодействия.

Тот факт, что проблема генерации изображения, проблема рендеринга относится непосредственно к машинной графике подтверждается всей историей ее развития. Вследствие постоянной смены аппаратной платформы графики, перехода программной реализации графических алгоритмов на аппаратный уровень происходит замена методов

рендеринга. Можно ожидать, что появление трехмерных графических дисплеев полностью изменит весь набор графических алгоритмов, но мало заденет проблематику проектирования видов отображения, их интерпретации и анализа.

Таким образом, предметом компьютерной визуализации как самостоятельной дисциплины является изучение методов и средств визуальной поддержки процессов анализа и интерпретации. При этом можно выделить, по крайней мере, следующие пункты:

- выделение объектов, подлежащих анализу, их основных состояний и особенностей, других важных характеристик;
- поиск и проектирование видов отображения, соответствующих объектам особого интереса, их состояниям, особенностям и характеристикам, а также моментам перехода из одного состояния в другое;
- выбор или проектирование методик рендеринга (то есть отображения визуальных объектов на плоскость вывода);
- поиск, выбор и проектирование методик человеко-машинного интерфейса, необходимого в процессе визуализации;
- изучение методик интерпретации визуальных видов отображения пользователем во время анализа как результатов моделирования, так и самих моделей.

Необходимо четко уяснить какие именно состояния и особенности данного объекта визуализации нас интересуют, так как представление особенностей, состояний и смены состояний и есть основная задача визуализации [7].

Существующие универсальные средства поддержки визуализации не всегда могут удовлетворить потребности пользователей в изучении новых модельных сущностей, обладающих не до конца ясными свойствами, или требуют от пользователя для представления этих сущностей слишком больших усилий. Следовательно, необходима разработка специализированных систем визуализации, при проектировании которых максимально учитываются нужды конкретных пользователей, решающих конкретный класс задач. Таким образом, одной из важнейших задач проектирования является обеспечение прагматических свойств систем визуализации, которые должны оцениваться с субъективных, пользовательских позиций. Можно сформулировать субъективный, ориентированный на пользователя подход к проектированию специализированных систем визуализации.

3. Специализированные 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 функциям, так и по использованным графическим средствам. Следует отметить две тенденции развития систем визуализации. С одной стороны - разработка универсальных средств визуализации, а с другой – специализация по всем направлениям, вплоть до создания специальных графических станций с реализацией для данного случая графическим алгоритмическим и программным обеспечением. Таким образом, системы визуализации, в свою очередь, можно разделить на универсальные и специализированные, обслуживающие определенный класс пользователей и задач и содержащих свои методики визуализации.

Универсальные системы визуализации характеризуются богатым набором средств визуализации и стандартных способов представления модельных сущностей - видов отображения. Как правило, в таких системах реализуется подход к описанию визуализации, основанный на потоке данных и поддерживающий конвейер визуализации

(фильтрация, мэппирование, рендеринг). Для описания визуализации предлагается визуальный язык на базе потока данных.

Характерным (хотя и несколько устаревшим) примером универсальной системы визуализации служит Open Visualization Data Explorer (DX), разработанный компанией IBM. (Первоначально эта система носила коммерческий характер, а в последствие стала доступна для свободного распространения.) Кроме этой системы популярными (также устаревшими) примерами универсальных систем визуализации в учебной литературе часто служат системы AVS/Express и IRIS. Также популярная система Visualization ToolKit (VTK), по сути, является библиотекой процедур, служащей для разработки специализированных систем. Несколько позднее была создана система ParaView [8], являющаяся в значительной мере параллельным вариантом VTK.

Средства визуализации в пакетах прикладных программ, например, таких как Matematika, Maple, MathCAD, также можно рассматривать как универсальные системы визуализации. Те математические объекты, расчет которых можно описать средствами пакета, можно и визуализировать, используя имеющиеся приемы и виды отображения с фиксированными параметрами. Часть пакетов для описания визуализации использует визуальные языки на базе потока данных.

Важной особенностью универсальных систем является наличие типового набора видов отображения для типовых математических объектов. Тем самым, они могут дать инструмент для разработки специализированной визуализации. Задача пользователя - так описать связь между модельными сущностями, которые необходимо визуализировать, и стандартными видами отображения, чтобы увидеть интересующие его особенности изучаемых объектов. Это зачастую требует от пользователя значительных усилий, а иногда вывод важных особенностей практически неосуществим. В принципе, при помощи универсальных систем можно отобразить любые математические объекты. Другой вопрос, какие усилия требуются от пользователя, причем не только (и не столько) при самой визуализации, сколько при интерпретации результатов. Вообще отметим, что полностью универсальных систем визуализации не существует. По сути, универсальные системы содержат некоторый стандартный набор (“универсальных”) видов отображения и приемов визуализации.

Специализированные системы облегчают работу пользователя, а, в случае исследования принципиально новых модельных объектов, только за счет их использования можно получить наглядное представление об их природе и особенностях.

Существует несколько подходов к обеспечению специализации.

Выделим, в частности, специализации систем по объектам визуализации. Например, системы визуализации сеток, могут осуществлять разнообразные методики вывода различных по типу и объему сеток, в том числе с использованием технологий виртуальной реальности.

В [9] описана среда (по сути, комбинированный набор нескольких пакетов графических функций), в которой на основе методов volume visualization (визуализации объемов), решается целый ряд задач, связанных с исследованием одного из типов турбулентности. При этом возможно сравнение различных подходов к визуализации модельных объектов.

Возможна реализация специализированных сред, в которых на основе одной методики визуализации решается целый ряд проблем из различных отраслей знаний. Однако анализ показывает, что классификация систем визуализации проводится, прежде всего, по научным направлениям, для которых разрабатываются соответствующие системы.

Имеет место подробная номенклатура отраслей научной визуализации, соответствующих научным отраслям и дисциплинам. Встречаются такие подразделы научной визуализации, как биомедицинская визуализация, химическая визуализация,

визуализация аэро и гидродинамики, географическая визуализация, визуализация в исследованиях климата и погоды.

При этом возможна разработка систем, пригодных для решения только одной, хотя и мощной задачи. Сравнительно старый (первой половины 90-х) пример [2] показывает, видимо, крайний вариант такой специализированной системы визуализации. Задача визуализации в этом случае заключается в выводе изоповерхностей результирующих данных физики взрыва, сгенерированных соответствующей программой. Результат работы этой программы - 300 000 000 вычислений ячеек, что составляет примерно 50 gigabytes на один дамп. Три дня работы установленного в Sandia National Laboratories суперкомпьютера ASCI Red могут дать 100 сжатых наборов данных, содержащих дампы, общим объемом порядка 350 Gb. В результате цикл обработки, включающий моделирование, визуализацию и анализ, был “втиснут” в 24 часа. При этом удалось достичь изучения изоповерхностей в реальном времени с использованием средств виртуальной реальности. Вывод одного кадра происходит примерно в 8 секунд. Для ускорения всего цикла работы были предприняты такие экстраординарные (по нашим тогдашним критериям) меры, как установка новой 16-процессорной графической станции, замена каналов передачи графической информации, а также распараллеливание всех пригодных для этого алгоритмов визуализационного конвейера.

Интересно, что тенденция в создании такого рода специализации в настоящее время только усиливается. В этой связи отметим, что в Sandia National Laboratories уже в середине этого десятилетия был установлен суперкомпьютер ASCI Red Storm, который, судя по словам разработчиков, можно рассматривать как специализированный вычислитель, в целом ориентированный на задачи газовой динамики.

Также в первой половине 90-ых годов в NASA для моделирования космических челноков (программа Space Shuttle) была разработана специализированная система Windtunnel [10]. Эта система, по сути, является системой визуализации для нужд аэродинамического моделирования. Характерным является, во-первых, огромная роль технологий виртуальной реальности в визуализации, во-вторых, неразрывная связь системы визуализации и мощной вычислительной модели, для которой система визуализации служит средством управления численным экспериментом. Хотя сама система Windtunnel уже не эксплуатируется, но активно используются аналогичные идеи сочетания в системах визуализации технологий виртуальной реальности и традиционных методик визуализации (векторные поля, поля скоростей, изоконтур и пр.), а также встраивания средств визуализации в мощные системы компьютерного моделирования. (См., например, [11]).

Существует тенденция разработки пакетов визуализации, которые затем могут использоваться в рамках конкретных средств моделирования. Примером такого пакета является разработанный в нашей стране мощный визуализатор ScientificVR [12], который можно рассматривать как специализированное средство визуализации для задач газовой динамики (хотя в целом эта система достаточна универсальна).

В настоящее время через интернет доступен огромный объем материалов - многие сотни статей и отчетов, большое количество диссертаций, учебных текстов. Имеется информация о десятках изданных за рубежом монографий на темы научной визуализации.

Изучение достаточно частного вопроса (например, проблемы визуализации потоков жидкости и/или газа) показывает наличие десятков, если не сотен, текстов, среди которых быстро выявляются свои “классические” труды ([13]), работы с технически сложными подходами к получению изображений, интересные работы, описывающие практически применимые приложения ([14]).

Таким образом, изучение статей, касающихся отдельных отраслей научной визуализации, позволяет уяснить, что каждое направление содержит свои (хотя иногда и совпадающие с другими отраслями) наборы моделируемых сущностей, объектов изучения и визуализации, методик выделения этих объектов, например, методики выделения

изоповерхностей. (Иногда даже кажется, что для каждого направления существует своя машинная графика, как, например, фрактальные методы, которые используются при генерации береговых линий.) Можно заключить, что для каждого подраздела визуализации, связанного с тем или иным научным направлением, характерны наиболее важные объекты визуализации, естественная образность, привычные виды отображения.

Как правило, исследования по научной визуализации построены по следующей схеме:

- постановка задачи,
- описание физической и компьютерной моделей,
- выделение визуализируемых сущностей,
- задание геометрии визуализируемых сущностей,
- описание методик визуализации и соответственно методик компьютерной графики, как аппаратных, так и алгоритмических,
- описание реализации,
- описание видов отображения.

Кроме этого в работах могут рассматриваться дополнительные проблемы, связанные с визуализацией, например, проблемы времени в визуализации (и on-line визуализации) или проблемы точности в визуализации (и визуализации точности), производительность систем визуализации и создания средств параллельной визуализации.

Интерес для нас представляет работы по оценке при помощи психофизических методов систем научной информационной визуализации.

Учебная литература, как правило, содержит следующие разделы:

- концепции визуализации, где рассматриваются такие важные понятия, как визуализационный конвейер, модель потока данных для систем визуализации и т.п.;
- характеристики данных, с их подразделениями на скалярные, векторные и т.п.;
- методики визуализации, где предлагаются приемы и методы визуализации для различных типов данных.

В учебных курсах обязательно изучается та или иная универсальная система визуализации, а также могут содержаться материалы по истории визуализации, восприятию визуальных образов, другие общие вопросы и полезные советы.

Таким образом, основная проблематика работ по визуализации связана с отображением модельных сущностей и рендерингом. Очень мало отражены вопросы интерпретации (тем более анализа визуализации). Кроме того, почти не поднимаются проблемы, связанные с разработкой видов отображения. Подразумеваются, что виды отображения заранее определены. Потому никаких усилий для их конструирования не прилагается. Заданным оказываются даже ракурсы и используемые цвета в тех или иных отображениях или они следуют по умолчанию. (Иногда кажется, что все картинки, сделанные при помощи DX, показывают одно и то же, хотя в одном случае поверхность представляет зависимость излучения от температуры, в другом совпадение данных при различных пропусках параллельной программы.) В практике разработки систем визуализации включение в научную визуализацию проблематики, связанной с обеспечением этапов фильтрации/восполнения данных, отображения и рендеринга, привело к сращению и смешению проблематики визуализации и машинной графики. Не разделяются два подхода к визуализации - иллюстративная и когнитивная визуализация.

4. Опыт разработки специализированных систем визуализации

Наш опыт дает ряд примеров использования специализированных систем визуализации для обеспечения анализа и интерпретации данных, полученных при решении сложных задач. Именно в этих случаях применение универсальных систем не позволяло увидеть необходимые особенности объектов моделирования, а в ряде случаев и вообще каким-то образом вывести изображения. Знания, полученные от пользователей и

касающиеся сущности и структуры изучаемых объектов, позволили разработать полезные средства визуализации.

Еще в 90-х годах была начата работа по визуализации построения максимальных стабильных мостов в линейных дифференциальных играх. Построение мостов ведется в трехмерном пространстве, определяемом двумерной фазовой переменной и временем. Каждая трубка (максимальный стабильный мост) соответствует определенному значению цены игры. Трубка задается набором параллельных двумерных многоугольных сечений, перпендикулярных оси времени.

Традиционные методы визуализации этих объектов заключались в построении проекций контуров сечений на плоскости, параллельных осям координат. При увеличении числа сечений изображение становится перегруженным. Одновременное же отображение нескольких трубок в этом случае является еще более затруднительным. Необходимо было показать объект в виде поверхности, со всеми ее особенностями. Под особенностями, в основном, понимаются нарушения гладкости, которые могут зарождаться и исчезать на сечениях трубки с течением времени. Далее, чтобы получить представление о функции цены игры в целом, нужно обеспечить одновременное отображение нескольких трубок, построенных для разных значений цены. При этом на изображении должны восприниматься как конкретные мосты, так и вся структура.

В результате была разработана первая версия системы, позволяющей в интерактивном режиме рассматривать трехмерное изображение трубок с разных положений. Далее было реализовано несколько версий этой системы визуализации, что вызвано как непрерывной сменой аппаратных и программных возможностей компьютерной графики, так и появлением новых подходов к визуализации изучаемых объектов. В настоящее время идет реализация очередной версии системы. Консультации с пользователями-математиками по данному вопросу ведутся весьма активно. По сути, они являются участниками разработок. Значительное внимание при визуализации в данном случае уделяется изучению сложных и вырожденных случаев. Полученные от пользователей данные о природе математических объектов позволили за счет определенного утрирования визуально выделить малозаметные нарушения гладкости и разрывы непрерывности в решениях дифференциальных игр [15,16]. Важным также является учет замечаний по пользовательскому интерфейсу, включая требования по размещению источников света, манипулированию объектами и пр. (См. рис. 1-4.)

Источником постановки следующей задачи, решенной несколько лет назад, послужил поиск областей достижимости в одной из задач оптимального управления. Ряд причин, связанных с реализацией алгоритма, привел к тому, что вычисленные данные составляют порядка десятков миллионов, а то и миллиардов точек, хранимых в bitmap-формате. Пользователю-математику необходимо изучать общий вид и внутреннюю структуру области достижимости для конкретной задачи. Очевидно, что огромный объем полученного расчетного материала потребовал использования средств трехмерной визуализации. Был создан комплекс программ, позволяющий провести фильтрацию данных не искажающую ни внешнюю и ни внутреннюю структуру объекта. Система позволяет отобразить как процесс построения области достижимости, так и сам объект в разных ракурсах.

Программный комплекс состоит из набора утилит для работы с огромным облаком точек и его последующей визуализации. Данные обрабатываются на разработанном специализированном “конвейере визуализации”, состоящем из следующих стадий:

- обработка исходных bitmap-файлов;
- вычисление освещенности;
- конвертирование в воксельный формат и создание структур хранения сцены;
- сглаживание воксельных объектов;
- конвертирование в полигональный формат.

В примере была рассмотрена так называемая сфера Лоренца, при расчете которой объем исходного файла составляет примерно 6,5 миллионов точек. В итоге получен графический объект, состоящий из около 40 000 полигонов [17]. (См. рис. 5) Кроме того, был получен фильм, отражающий процесс построения сферы, что было весьма полезно разработчикам алгоритма. Полученные от математиков сведения о топологии “сферы”, ее однородности и непрерывности позволили применить конвертирование графических данных из формата в формат.

Следующая задача, решенная также несколько лет назад, связана с решением прикладной задачи, связанной с управлением ходом химических процессов.

Важную информацию о реакциях, протекающих при процессах динамического кинетического расщепления, можно извлечь из данных о кинетике их протекания. В частности, для оценки эффективности процесса необходимо знание скоростей его элементарных реакций. Для нахождения скоростей обычными статистическими методами требуется провести большое число экспериментов. Из-за высокой стоимости компонентов, участвующих в реакции, это весьма неэкономично. Поэтому была разработана параллельная программа для поиска скоростей, позволяющая обойтись малым числом экспериментов. При проведении химического опыта в определенные промежутки времени замеряются концентрации интересующих веществ. Затем строится математическая модель, описывающая поведение этих концентраций. Ее параметрами служат скорости протекания элементарных реакций. Некоторый набор скоростей считается допустимым, если при моделировании процесса расщепления концентрации веществ меняются в соответствии с экспериментальными данными. При этом учитываются погрешности замеров в эксперименте. Множество всех допустимых наборов скоростей есть информационное множество, которое в данном случае состоит из около миллиона четверок чисел. Таким образом, задача нахождения четверки скоростей элементарных реакций свелась к задаче нахождения информационного множества. Изучение геометрического строения этого множества позволяет исследовать взаимосвязь элементарных реакций, участвующих в процессе расщепления. Так встает задача изучения геометрии информационных множеств, а вместе с ней - проблема их графического представления. Конкретно, требуется метод визуализации, с помощью которого можно было бы исследовать локальные и глобальные характеристики расположения множеств в четырехмерном пространстве. К ним относятся, например, локальное строение окрестностей, связность, выпуклость и ориентация в четырехмерном пространстве.

Очевидно, что при визуализации четырехмерного информационного множества не существует естественной образности для многомерных множеств. В литературе описаны некоторые приемы представления четырехмерных множеств, однако, все они оказались неприемлемы для данного случая. Исходя из знаний об априорной структуре множеств и цели, поставленной перед визуализацией, и после длительного анализа структуры множеств, целей моделирования и опыта представления многомерных объектов был предложен ряд методик визуализации четырехмерных множеств. В ходе консультаций с заказчиками-математиками среди предложенных видов отображения были выбраны приоритетные, которые легли в основу комбинированного метода и созданной системы многомерной визуализации. Успех в данном случае связан с возможностью разделения координат четырехмерной точки на две сравнительно независимые пары, так, 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. (См. рис. 6.) Был разработан комплексный подход к визуализации, в основе которого лежит идея интерактивного

взаимодействия с пользователем с использованием нескольких видов отображения. При этом каждый вид отображения связан с другими, что позволяет проводить навигацию по множеству и извлекать все его необходимые свойства. Таким образом, в ходе реализации системы был предложен новый подход для представления информационных множеств, что в принципе решает задачу их представления [18], [19].

Роль пользователей при решении данной задачи – очень существенна. Без передачи ими знаний о сути явлений задача в принципе не могла быть решена.

В течение ряда лет нами активно разрабатывалась система визуализации для задач математической физики, в частности, связанных с сеточными методами вычислений. Основные данные, получаемые в результате расчетов для аэро- и гидродинамических задач – это массивы значений газодинамических параметров в узлах расчетной трехмерной сетки. Поля газодинамических величин могут быть как скалярными (например, давление, плотность, число Маха, энтропия), так и векторными (поле скоростей). Кроме того, исследователей интересует не только пространственная картина течений, но и распределение величин (плотности, давления) на поверхности. Проект системы визуализации параллельных вычислений предполагал ее функционирование по следующей схеме:

- задача считается на параллельном вычислителе и оставляет (окончательный или промежуточный) результат в файлах или в памяти процессоров вычислителя;

- на параллельном же вычислителе проводится некоторая предобработка и фильтрация данных, связанная с будущей визуализацией;

- по заданию пользователя строятся модули описания параллельных фильтров и видов отображения, на вход которых подаются данные после предобработки (на первых этапах предлагается использовать предопределенные в системе виды отображения);

- сама визуализация может идти как на графической рабочей станции, так и на параллельном вычислителе.

Рассматривалось два варианта использования системы – в off-line (после окончания счета) и on-line (по ходу счета параллельной программы) режимах. Также рассматривается два варианта размещения средств предобработки и визуализации на процессоры параллельного вычислителя – на те же процессоры, где происходил счет или на дополнительно выделенные процессоры вычислителя.

В первом варианте системы рассматривалась регулярная сетка, которая состоит из набора стандартных модулей, например, “прямоугольник”, “квадрат-цилиндр”, “полусфера”, “квадрат” и “законная область”. При этом каждый модуль состоит из нескольких блоков регулярных сеток, ограниченных границами. Программа должна наглядно отображать сеточные данные больших объемов с возможностью поиска аномалий в структуре сетки. Был разработан комплексный вид отображения с элементами интерактивного взаимодействия. При этом в один вид отображения заложена способность к изменению множества параметров, существенно влияющих на адекватность восприятия его содержимого в конкретной ситуации. Предполагалось, что может меняться размерность, метод рендеринга, набор доступных функций пользовательского интерфейса, все это будет (возможно, автоматически, в зависимости от некоторого набора внешних факторов). Так, например, при построении сечений сетки плоскостью, удобно спроецировать вид отображения на плоскость перпендикулярную секущей. Использование нескольких методов рендеринга в одном виде отображения заметно повышает его универсальность. Возможности полигональной графики позволяют очень детально описать блочную структуру сетки, иерархию составных частей и особенности ее внутреннего устройства. Воксельная графика подчеркивает прикладное значение сеточных задач, отображая не дискретное множество точек, а трехмерную модель в виде непрерывного массива информации.

Для отображения сеток на базе полигональной графики была разработана среда, которая представляет собой специализированную систему визуализации по выводу

сеточных данных с управляемой камерой и системой фильтрации данных. Навигация в системе представляет собой совокупность функций управления камерой. При этом используется проекционная система манипуляции данными. Функции манипуляции данными разделены на группы, такие как “перемещение”, “вращение”, “построение сечений” и т.д.

Система оперирует данными больших объемов. Без эффективных механизмов фильтрации данных возможно снижение производительности. Также неизбежно падение общей эффективности системы за счет перегруженности видов отображения ненужной информацией. Работа системы фильтрации данных состоит из двух частей: “пространственной” и “качественной”. Пространственная фильтрация заключается в выделении необходимого объема сеточных данных на основе их пространственного расположения. Очевидно, что одновременный вывод на экран всего слишком большого объема данных влечет за собой снижение уровня детализации. Кроме того, из-за большой некомпактности визуализируемых данных, более далекие от наблюдателя участки могут оказаться вне поля зрения, будучи скрытыми близкими участками. Пространственная фильтрация отчасти решает эту проблему, выделяя область интересующей нас информации из общего ее объема. Функции пространственной фильтрации реализованы с помощью метафоры “альфа-сферы”. Суть метафоры состоит в том, что из общего объема данных выделяется сферическая область. При этом визуальная прозрачность объектов, находящихся внутри области, прямо пропорциональна удаленности объектов от центра области. Таким образом, информация, представляющая для нас наибольший интерес, видна лучше всего, а остальная - тем меньше, чем более удалена от центра области рассмотрения. Фильтрация “по значению” необходима для отсека ненужных участков визуализируемых данных на основании значения каких-либо характеристик, заданных на этих участках. “Блочная фильтрация” является наименее универсальным методом фильтрации данных, но, тем не менее, эффективно применялась в нашей системе. При визуализации структуры сеток и данных на них возникают задачи как непосредственно отображения сеток и данных в целом, так и задачи построения сечений и изоповерхностей на сетках. Было проведено исследование, которое показало, что возможности воксельной графики позволяют реализовать эти задачи, и что виды отображения на основе ее могут служить мощным дополнением к видам отображений на основе полигональной графики.

Возможности воксельной графики позволяют отображать внутреннюю структуру всей сетки и ее блоков (используя метафору прозрачности), а уровень современных видеокарт позволяет добиться интерактивного построения сечений и изоповерхностей как всей сетки, так и отдельных ее участков. При этом существует возможность аппаратной реализации отдельных алгоритмов. Был разработан вид отображения, позволяющий в режиме реального времени просматривать динамику сечений отображаемой сетки – “режим радара”. В нем производится перемещение секущей плоскости от одной стороны воксельного куба к другой, что и позволяет просматривать динамику сечений параллельными плоскостями.

Проведенные исследования показывают, что использование воксельной графики является перспективным направлением в области визуализации сеток и данных на них.

Второй вариант системы предполагал вывод нерегулярных сеток различной конфигурации и размера (от нескольких десятков тысяч до нескольких миллионов вершин).

С помощью данной системы были эффективно визуализированы сеточные данные различных типов, в частности, блочная сетка с шестигранными примитивами и сплошная тетраэдральная [20-21]. (См. рис. 7-11.)

Реализация данного проекта активизировала наши работы по on-line и удаленной визуализации в связи с разработкой средств отображения сеток сложной структуры и большого объема в рамках Грид-технологий. Это позволит пользователям инженерных пакетов получить широкий доступ к новым мощным методикам визуализации и резко

усилить возможности анализа и интерпретации данных. Наиболее эффективными из возможных решений являются применение on-line визуализации и распределенной фильтрации данных большого объема, как в рамках проблемно-ориентированного, так и аппаратно-независимого подходов. Эффективность при отображении сеток большого объема достигается за счет минимизации передаваемых данных (фильтрации) и использования аппаратных возможностей современных видеокарт. При этом пользователи должны в рамках Грид-технологий получить гибкие средства представления трехмерных сеток различной структуры и объема, навигации по сеткам, создания изоповерхностей, векторных полей и т.п. [22]. (См. рис. 12.)

Одним из интересных вариантов решения такой задачи является применение технологии удаленной визуализации. В этом случае и фильтрация данных, и рендеринг происходит удаленно на выделенных вычислительных мощностях, а рабочее место пользователя является терминалом по работе с удаленным графическим приложением. Передача растровых данных по сети в определенных задачах и конфигурациях оказывается выгоднее, чем передача геометрических данных. Решение конкретной задачи требует как специализации (в том числе разработки специфических видов отображения), так и организации взаимодействия между подсистемами, отвечающими за отдельные этапы технологического цикла (создания иерархии проблемно-ориентированных оболочек CAEBeans над CAE-пакетом) [23].

Описание результатов первой очереди данного проекта будет сделано в ближайшее время.

В большинстве случаев заказчиками нашей работы были специалисты в области прикладной и вычислительной математики, что в значительной мере облегчало нашу работу. Действительно, в данном случае и разработчики и заказчики имеют общую математическую подготовку и, если, так можно высказаться, говорят на одном языке. Более сложной становится задача при создании средств визуализации для “нематематических” приложений, в частности для медицины.

Интересный опыт связан с разработкой визуальной системы поддержки модели распространения возбуждения в камере сердца. В основе работы лежит идея представления проводящей системы миокарда в виде множества связанных между собой клеток, которые могут передавать друг другу управляющие сигналы. На базе этого представления удалось смоделировать патологии типа тахикардии и эстрасистолий. В ходе выполнения проекта разработчики под руководством заказчика, специалиста в области кардиологии, изучали физиологию и патологию проводящей системы миокарда, провели анализ возможностей их моделирования. С активным участием заказчиков и будущих пользователей были определены основные параметры моделирующей системы. Модель описывает миокард предсердия и имитирует распространение возбуждения по поверхности сердечной мышцы. Поверхность представлена в виде множества связанных между собой клеток, которые могут передавать друг другу сигнал. Модель несколько напоминает работу нейронных сетей, однако в данном случае каждая клетка может пребывать в одном из трёх состояний. Пользователю предоставляется возможность изменять параметры модели, в частности, временные интервалы, соответствующие различным состояниям клетки, задавать систему генерации начального сигнала, определяя, какие клетки будут генерировать сигнал самостоятельно (то есть задавать патологию). Существует также возможность наблюдения за состоянием отдельных клеток в виде осциллографа, отмечающего прохождение волны возбуждения через данную клетку. Для более плотного взаимодействия клеток была принята гексагональная схема расположения клеток на поверхности, которая изображается, в свою очередь, на плоскости. Трёхмерная модель, сгенерированная на первых этапах, была отброшена в связи со сложностью зрительного восприятия такого представления. Плоское представление в данном случае оказалось более выигрышным в плане удобства работы

пользователя, что является здесь основным критерием. Несмотря на ряд принятых ограничений, модель вполне удовлетворила требованиям пользователя. Очень серьезным результатом явилась компьютерная реализация предложенной модели. Эта реализация, несмотря на ряд сделанных в ее ходе упрощений истинной картины работы проводящей системы сердца, позволила достаточно точно и полно рассматривать работу сердца, меняя параметры модели, задавать различные патологии и, наконец, моделировать методы терапевтического и хирургического лечения задаваемых пользователем патологий. За счет реализации визуальных и интерактивных аспектов модели уже на начальных стадиях реализации началось ее активное использование кардиологами. После доводки модели началась ее опытная эксплуатация. Разработанная модель проводящей системы сердца была предназначена для использования на начальных стадиях планирования операций, при разработке и проверке методик терапевтического лечения, а также при подготовке студентов и специалистов кардиологов. Важную роль сыграли заказчики-медики, которые сумели передать знания в чрезвычайно сложной области кардиологии и оказали существенное влияние на выбор методики визуального моделирования.

Эта сравнительно небольшая работа послужила для нас образцом при взаимодействии со специалистами-медиками, задачи которых требуют сложной и интересной визуализации.

Результатом обобщения опыта проведенных нами исследований и реализации конкретных систем явились приводимые ниже приемы построения видов отображения и схема построения специализированных систем визуализации.

5. Построение видов отображения

Рассмотрим приемы построения видов отображения.

Отметим, что особенно сложно найти методы визуализации и соответствующую им 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 случае визуализации четырехмерных множеств проблема была решена за счет такого приема визуализации, как создание специальных визуальных объектов, не имеющих соответствия среди модельных объектов, но обеспечивающих их анализ и интерпретацию [18-19]. В системе визуализации построения максимальных стабильных мостов в линейных дифференциальных играх был использован другой прием - визуальное утрирование особенностей для их быстрого опознания [15]. 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.

При построении 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 [24]. (См. рис.13-14.)

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 обо всем процессе в целом, то есть о его фоновых значениях и всех всплесках [25]. (См. рис. 15.)

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” [10], служащая, в частности, для визуализации компьютерного моделирования космического челнока.

Однако использование естественной образности не избавляет от необходимости поиска специальных методик визуализации. Например, в разработанной нами 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. (См. рис. 16.)

Наряду с использованием естественной образности и кинематографических приемов используются привычные для исследователя графики и таблицы [25]. 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 [26]. 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. 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 поверхности, манипуляции с визуальными объектами (изменение положения и ориентации объекта в трехмерном пространстве, масштаба вывода изображения и пр.) становятся затруднительными. Было предложено использовать для таких действий специальное окно, упрощенно повторяющее основное. В дополнительном окне проводятся манипуляции, немедленно отображающиеся на основном изображении [25]. (См. рис. 17.)

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 и визуализации программного обеспечения. Тогда же в конце 80-ых, начале 90-ых годов были разработаны системы отладки производительности параллельных систем, в которых методы, ранее применяемые в статистической графике, были использованы при

разработке видов отображения для данных о производительности параллельных 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 [26], оказались неприменимы для отображения многомерных медицинских данных.

Сформулируем приемы построения видов отображения в специализированных системах компьютерной 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.

Опыт реализации зарубежных систем визуализации, также как и наш собственный опыт разработки показывает, что методики визуализации играют самостоятельную роль при выделении особенностей модельных объектов и описании характеристик тех или иных процессов.

6. Схема проектирования и реализации систем визуализации

Предлагаемую нами методику проектирования и разработки специализированных систем визуализации можно описать в виде некоторой схемы, предписывающей порядок проектирования и непосредственной реализации систем. Прежде всего, схема состоит из ряда позиций, по которым ведется проектирование системы визуализации. Схема включает в себя также последовательность вопросов, связанных с этими позициями, а также анализа возникающих по ходу процесса проектирования проблем. Основные позиции проектирования в свою очередь определяют набор ролей участников процесса проектирования и разработки. Опишем сначала участников процесса разработки, понимая при этом, что в реальном проекте одни и те же люди могут играть разные роли.

В проектировании и разработке участвуют следующие специалисты:

- заказчик-пользователь,

- проектировщик визуализации,

- специалист в методах компьютерной графике и человеко-компьютерного взаимодействия,

- системный программист.

Основные позиции схемы проектирования специализированных систем визуализации суть следующие:

- решаемая проблема (задача);

- пользователь, для которого предполагается построить средства визуализации;

- программа, решающая данную проблему;

- образность визуализации и методы взаимодействия;
- методики генерации и вывода графики;
- системные вопросы.

Теперь рассмотрим (вероятно, неполный) круг вопросов, возникающих в связи с каждой позицией. Отметим, при этом, что все полученные разделы тесно связаны друг с другом, а вопросы из одного раздела, по сути, вытекают из ответов на вопросы из предыдущих.

Решаемая проблема (задача)

необходимо уяснить ряд пунктов и получить ответ на вопросы:

область исследования, ее физическая и математическая модели, мерность модели и ее объектов, методы и алгоритмы получения численного решения; какова цель моделирования, каков набор основных сущностей моделирования, каковы объекты особого интереса, наличие особых точек, аттракторов, сингулярностей, etc., можно ли (и нужно ли) изучать эти сущности и объекты особого интереса при помощи косвенных методов и использования специально построенных искусственных объектов (артефактов), анализа дополнительных характеристик;

Пользователь проектируемой системы визуализации

необходимо уяснить ряд пунктов и получить ответ на вопросы:

специальность пользователя, используемые методики исследования, каков набор знаний пользователя (общих, специальных и компьютерных), профессиональная культура, опыт работы с вычислительными и, в частности, с визуальными системами (позитивный и негативный), каковы стимулы и мотивации пользователя, каковы особенности национальной культуры, возможно влияющие на его восприятие визуальных образов, каковы психофизиологические свойства пользователя, включая возрастные, гендерные и эмоциональные особенности, какие знания пользователя о модели и программе могут быть использованы при создании видов отображения и генерации конкретных графических выводов;

Программа

необходимо уяснить ряд пунктов и получить ответ на вопросы:

имеет место параллельное, распределенное или последовательное исполнение, существует ли возможность on-line визуализации (то есть доступа к данным во время выполнения программы), если нет, то оставляет ли программа результаты счета во внешней памяти или файловой системе, есть ли возможность по ходу выполнения программы “разметить” исходные данные с тем, чтобы облегчить выделение особенностей;

Образность визуализации и методы взаимодействия

необходимо уяснить ряд пунктов и получить ответ на вопросы:

присущая данной проблематике образность, возможность применения и/или генерации метафоры визуализации, какова цель визуализации, какие объекты будут показываться в каждом конкретном случае, как мы сможем отобразить интересующие пользователя объекты, возможность использования стандартных видов отображения и методов взаимодействия с пользователем для отображения важных и интересных особенностей и объектов или необходимость для этого поиска или генерации новых видов отображения, роль динамики для представления изучаемых процессов, возможность использования технологий виртуальной реальности, какие методы человеко-компьютерного взаимодействия следует использовать в выбранных видах отображения;

Методики генерации и вывода графики

необходимо уяснить ряд пунктов и получить ответ на вопросы:

какие методики генерации изображения (рендеринга) адекватны выбранным видам отображения, с учетом потенциальной анимации, виртуальной реальности и пр.

Системные вопросы

Системные вопросы возникают в связи с реализацией интерфейса между компонентами проектируемого программного комплекса. Особенно серьезными эти вопросы становятся в случае параллельной или распределенной его реализации.

7. Перспективы исследований и разработок

По нашему мнению перспективы научной визуализации, прежде всего, связаны со средами виртуальной реальности, о которых уже неоднократно упоминались выше. Хотя системы визуализации на базе виртуальной реальности используются еще с начала 90-ых годов, остается очень много вопросов, начиная с потенциальных расстройств здоровья, возникающих при работе с ними (так называемая *cybersickness* – киберболезнь), и кончая проблемами эффективности их применения. Если в системах обучения и симуляции (например, в медицине, авиации и космонавтике) без использования виртуальной реальности не обойтись (или же придется платить слишком большую цену за обучение новичков на настоящих летательных аппаратах и т.п.), то для систем научной визуализации надо еще показать, дает ли виртуальная реальность новое качество по сравнению с “традиционной” трехмерной графикой и даже, может ли пользователь эффективно решать сложные задачи в условиях “погружения” в абстрактную среду, смоделированную при помощи компьютера [27]. Далее, хорошо известно, какую важную роль играет обеспечение взаимодействия с пользователем в процессе интерпретации и анализа данных при работе в средах визуализации. Использование средств трехмерной графики, в том числе, базирующихся на средах виртуальной реальности, естественно требует появления “трехмерных” средств ввода и построения на их базе систем человеко-компьютерного взаимодействия. К настоящему времени известен целый ряд подобных устройств, построенных на различных физических принципах. Вместе с тем, возникают проблемы с применением сложных систем ввода в средах визуализации. Причем сложности возникают как с эксплуатацией и непосредственным использованием техники, так и с диалоговыми языками ввода и взаимодействия. Появляется задача разработки простых средств ввода в системах визуализации, адекватных задачам, стоящим перед пользователями – исследователями и/или разработчиками сложных компьютерных моделей. (См. работу [28] и предложенный там “интерфейс фонарика”).

Средства вывода, которые используются в настоящее время и в системах на базе “традиционной” трехмерной графики и системах на базе сред виртуальной реальности можно подразделить на следующие виды:

- экраны рабочих станций;
- “большие” экраны и экранные панели различных типов;
- шлемы и очки виртуальной реальности;
- “театры виртуальной реальности” на базе CAVE-систем.

Во всех случаях изображение генерируется на (как правило, вертикальную) плоскость вывода, а с помощью разнообразных ухищрений создается впечатление трехмерности. Именно на обеспечение этой “квазитрехмерности” нацелены все методы рендеринга, именно ее учитывают при разработке видов отображения в системах визуализации и методов манипуляции изображениями и взаимодействия с ними.

Уже более десятка лет появляются сведения о создании “настоящих” трехмерных устройств вывода, основанных на различных принципах генерации изображений. Судя по публикациям, дело идет к тому, что вывод будет осуществляться подобно тому, как в реальности на горизонтальной поверхности стола или ящика с песком расставляются

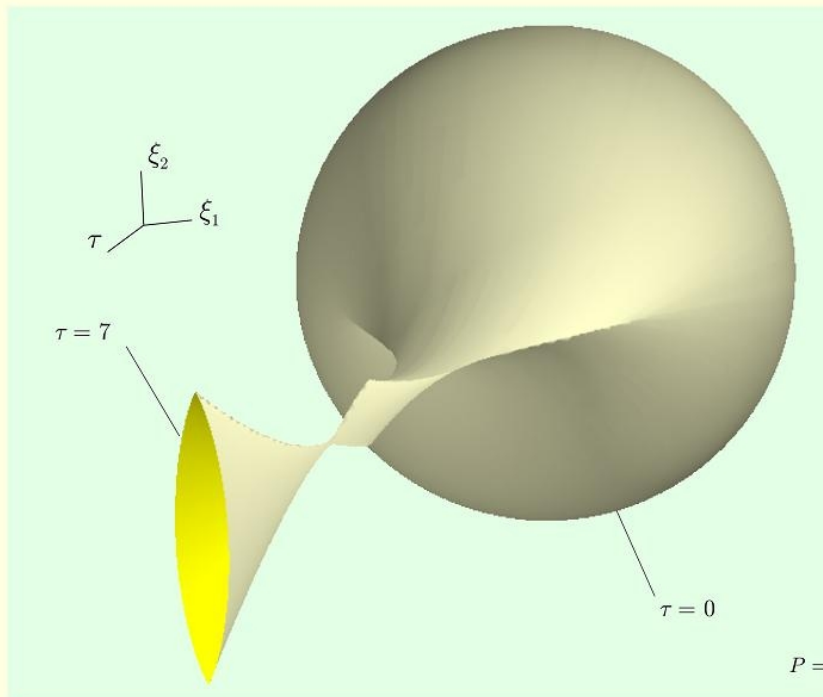
макеты различных объектов. В принципе осуществима генерация изображения внутри поверхности сферы или призмы (подобно театральной сцене). Пока, кажется, нет промышленных образцов таких изделий. Однако время их должно наступить в самом ближайшем будущем. Возможна также какая-то комбинация устройств виртуальной реальности (в том числе CAVE-систем), “настоящей” трехмерной графики и трехмерного ввода. Соответственно этому должны измениться как методы программного обеспечения компьютерной графики, так и принципы построения средств научной визуализации. Одна из задач сейчас – подготовиться к резким изменениям аппаратуры и программного обеспечения и начать проектирование действительно полезных и удобных систем визуализации.

Литература

1. Visualization in Scientific Computing, Special Issue, ACM SIGGRAPH Computer Graphics, V. 21, N 6, November 1987.
2. Heermann Ph. D. Production Visualization for the ASCI One TeraFLOPS Machine // Proceedings of the 9th Annual IEEE Conference on Visualization, Oct 18-23 1998, ACM Press, New York, 1998, pp. 459-482.
3. Самарский А.А. Математическое моделирование и вычислительный эксперимент // Вестник АН СССР 1979, N 5. Стр. 38-49.
4. Авербух В.Л. К теории компьютерной визуализации // Вычислительные технологии. Т. 10, N 4, 2005, стр 21-51.
5. HyperVis - Teaching Scientific Visualization Using Hypermedia. Project Director: G. Scott Owen; Contributors to HyperVis: Gitta Domik, Theresa-Marie Rhyne, Ken W. Brodlie, Beatriz Sousa Santos. 1999.
<http://www.siggraph.org/education/materials/HyperVis/hypervis.htm>
6. Robertson P.K. A Methodology for Choosing Data Representations // IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 11, No. 3, May 1991, pp. 56-68.
7. Авербух В.Л., Байдалин А.Ю., Васёв П.А., Горбашевский Д.Ю., Исмагилов Д.Р., Казанцев А.Ю., Манаков Д.В., Шинкевич А.Н. Проблемы разработки средств визуализации для супервычислений // Параллельные вычислительные технологии / Труды научной конференции. Челябинск. Издательство ЮУрГУ, 2007. Том 2. Стр. 201-211.
8. Cedilnik A., Geveci B., Moreland K., Ahrens J., Favre J. Remote Large Data Visualization in the ParaView // Eurographics Symposium on Parallel Graphics and Visualization 2006, pp. 163-170.
9. Clyne J., Scheitlin T., Weiss J. B. Volume Visualizing High-Resolution Turbulence Computations // <http://www.cs.sandia.gov/VIS/cubitvr.html>
10. Bryson S., Levit C. The Virtual Wind Tunnel // IEEE Computer Graphics and Applications, Volume 12, Issue 4 (July 1992), p. 25-34
11. Liu Z., Moorhead R.J., Ziegeler, S., 2003, Ocean Flow Visualization in Virtual Environments // Tech. Rep. MSSU-COE-ERC-03-03, Miss. State Univ. ERC, pp. 11-15.
12. Бабаев Д.Б. Функциональные возможности визуализатора ScientificVR // Супервычисления и математическое моделирование: Тезисы международного семинара. Саров, 2003 ВНИИЭФ-РФЯЦ. Стр. 17-19.
13. van Wijk J.J. Image Based Flow Visualization // Proceedings of ACM SIGGRAPH 2002. ACM Transactions on Graphics vol 21, no 3, p. 745-754.
14. Potiy O.A. Anikanov A.A. GPU-Based Texture Flow Visualization // THE 14th International Conference on Computer Graphics and Vision GraphiCon'2004, September 6-10, 2004 Moscow, Russia. Conference Proceedings. Pp. 155-158.
15. 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.
16. Зенков А.И. Разработка подхода к созданию специализированных систем визуализации для высокопроизводительных научных вычислений // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2003. Вып. 4. С. 81-86.
 17. Мошков А.В., Пахотинских В.Ю., Решетняк В.О. Специализированная система визуализации некоторых задач оптимального управления // 14-я Международная Конференция по Компьютерной Графике и Зрению ГрафиКон'2004, 6-10 Сентября 2004, Москва, Россия. Труды Конференции. МГУ им. М.В. Ломоносова. Стр. 299-301.
 18. Васев П.А., Перевалов Д.С. Один метод визуализации 4-х мерных множеств // Материалы Всероссийской научной конференции “Суперкомпьютерные вычислительноинформационные технологии в физических и химических исследованиях”. Черногловка. Подмосковный филиал МГУ им. М.В.Ломоносова, Институт Проблем Химической Физики РАН, 2001, с. 32-6.
 19. Васев П.А., Перевалов Д.С. О создании методов многомерной визуализации // Труды 12-й международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению “ГрафиКон'2002”. НГУ, 2002. С. 431-437.
 20. Авербух В.Л., Васёв П.А., Горбашевский Д.Ю., Казанцев А.Ю., Манаков Д.В. Система интерактивной визуализации параллельных вычислений // 14-я Международная Конференция по Компьютерной Графике и Зрению ГрафиКон'2004 6-10 Сентября 2004 Москва, Россия. Труды Конференции. МГУ им. М.В. Ломоносова. Стр. 291-294.
 21. Горбашевский Д.Ю., Казанцев А.Ю. Визуализация сеточных данных большого объема // 15-я Международная конференция по компьютерной графике и ее приложениям ГрафиКон'2005. Труды Конференции. Новосибирск, стр. 366-367.
 22. Авербух В.Л., Байдалин А.Ю., Бахтерев М.О., Васёв П.А., Горбашевский Д.Ю., Казанцев А.Ю., Манаков Д.В., Шинкевич А.Н. Создание грид-сервисов для автоматизированной интеграции инженерных пакетов и интерактивных средств визуализации // Тезисы 10-го Международного семинара “Супервычисления и Математическое моделирование”, РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2008, с. 14-15.
 23. Радченко Г.И., Соколинский Л.Б., Шамакина А.В. Разработка компонентно-ориентированных CAEBean-оболочек для пакета ANSYS CFX // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2008): Труды международной научной конференции, Электронное издание, УДК 004.75, Челябинск, Издательство ЮУрГУ, 2008. Стр. 438 -443.
 24. Averbukh V.L., Kumkov S.S., Patsko V.S., Pykhteev O.A., Yurtaev D.A. Specialized Visualization Systems for Differential Games // Progress in Simulation, Modeling, Analysis and Synthesis of Modern Electrical and Electronic Devices and Systems N.E.Mastorakis (ed). S.L.: WSES Press, 1999. P.301-306.
 25. Авербух В.Л., Байдалин А.Ю., Горбашевский Д.Ю., Исмагилов Д.Р., Исмагилов Т.Р., Чернин Р.М. Разработка видов отображения в специализированных системах компьютерной визуализации // Труды 12 Международной Конференции по Компьютерной Графике и Машинному Зрению ГрафиКон'2002. Нижний Новгород, НГУ. Нижний Новгород, 2002. Стр. 184-189.
 26. Spence R. Information Visualization. L. Addison-Wesley, 2001.
 27. Авербух Н.В., Щербинин А.А. Виртуальная реальность в образовании // Третья международная конференция “Информационно-математические технологии в экономике, технике и образовании” г. Екатеринбург, 2008 г. Тезисы докладов. Стр.267-268.
 28. Зырянов А.В. Методы ввода и распознавания жестов для взаимодействия с виртуальными средами // Третья международная конференция “Информационно-математические технологии в экономике, технике и образовании” г. Екатеринбург, 2008 г. Тезисы докладов. Стр. 282-283.

Иллюстрации



„УЗКАЯ ШЕЙКА“

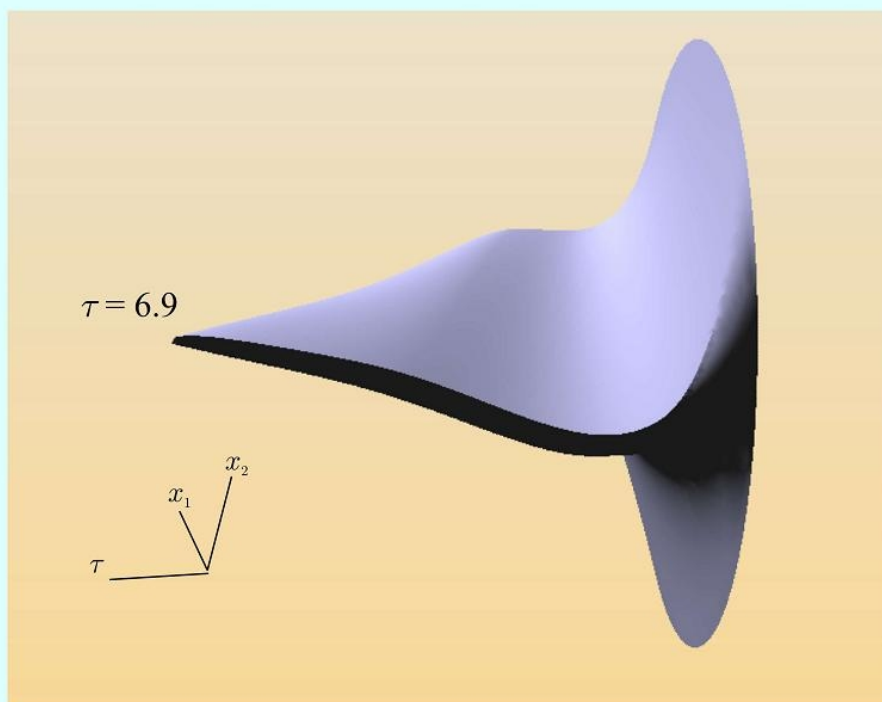
$$\begin{aligned}\ddot{x} &= F, \\ \dot{F} &= -(F - u)/\tau_P, \\ \dot{y} &= v,\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}t &\in [0, T], \quad x, y \in \mathbb{R}^2, \\ u &\in P, \quad v \in Q, \\ \varphi(x(T), y(T)) &= |x(T) - y(T)|, \\ T &= 2.0, \quad \tau_P = 1,\end{aligned}$$

$$P = \left\{ u \in \mathbb{R}^2 : \frac{u_1^2}{0.67^2} + \frac{u_2^2}{1.00^2} \leq 1.30^2 \right\},$$

$$Q = \left\{ v \in \mathbb{R}^2 : \frac{v_1^2}{0.71^2} + \frac{v_2^2}{1.00^2} \leq 1.0^2 \right\}.$$

Максимальный стабильный мост (множество уровня функции цены) для значения платы 1.546.



„КНОПКА“

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_1 + 2x_2 + v, \\ \dot{x}_2 &= x_2 + u,\end{aligned}$$

$$|u| \leq 1, \quad |v| \leq 0.9, \quad \varphi(x_1(T), x_2(T)) = x_1^2(T) + x_2^2(T).$$

Максимальный стабильный мост (множество уровня функции цены) для значения платы 7.0; $\tau = T - t$ — обратное время.

СГЛАЖИВАНИЕ С РОСТОМ УРОВНЯ

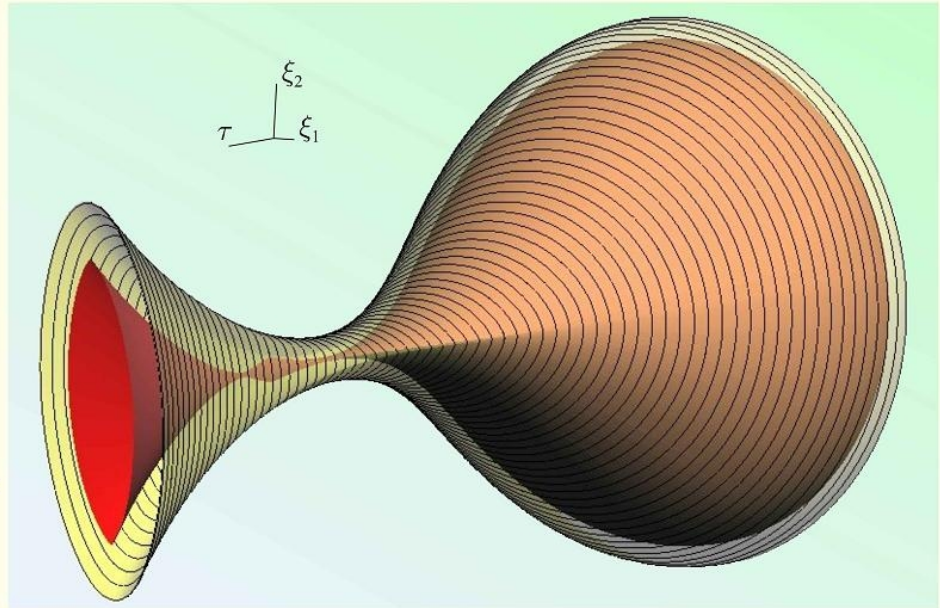
$$\begin{aligned}\dot{x} &= F, \\ \dot{F} &= -(F - u)/\tau_P, \\ \dot{y} &= v,\end{aligned}$$

$$t \in [0, T], \quad x, y \in \mathbb{R}^2, \quad u \in P, \quad v \in Q,$$

$$\begin{aligned}\varphi(x(T), y(T)) &= |x(T) - y(T)|, \\ T &= 7.0, \quad \tau_P = 1,\end{aligned}$$

$$P = \left\{ u \in \mathbb{R}^2 : \frac{u_1^2}{0.67^2} + \frac{u_2^2}{1.00^2} \leq 1.30^2 \right\}, \quad Q = \left\{ v \in \mathbb{R}^2 : \frac{v_1^2}{0.71^2} + \frac{v_2^2}{1.00^2} \leq 1.0^2 \right\}.$$

Максимальный стабильный мост (множество уровня функции цены) для значений платы 1.546 (красное множество) и 1.67 (желтое полупрозрачное множество).



ОБРЫВ ОКОЛО „УЗКОЙ ШЕЙКИ“

$$\begin{aligned}\dot{x} &= F, & t \in [0, T], \quad x, y \in \mathbb{R}^2, \quad u \in P, \quad v \in Q, \\ \dot{F} &= -(F - u)/\tau_P, & \varphi(x(T), y(T)) &= |x(T) - y(T)|, \\ \dot{y} &= v, & T &= 7.0, \quad \tau_P = 1,\end{aligned}$$

$$P = \left\{ u \in \mathbb{R}^2 : \frac{u_1^2}{0.67^2} + \frac{u_2^2}{1.00^2} \leq 1.30^2 \right\},$$

$$Q = \left\{ v \in \mathbb{R}^2 : \frac{v_1^2}{0.71^2} + \frac{v_2^2}{1.00^2} \leq 1.0^2 \right\}.$$

Максимальный стабильный мост (множество уровня функции цены) для значений платы 1.48 (красное множество) и 1.546 (желтое полупрозрачное множество).

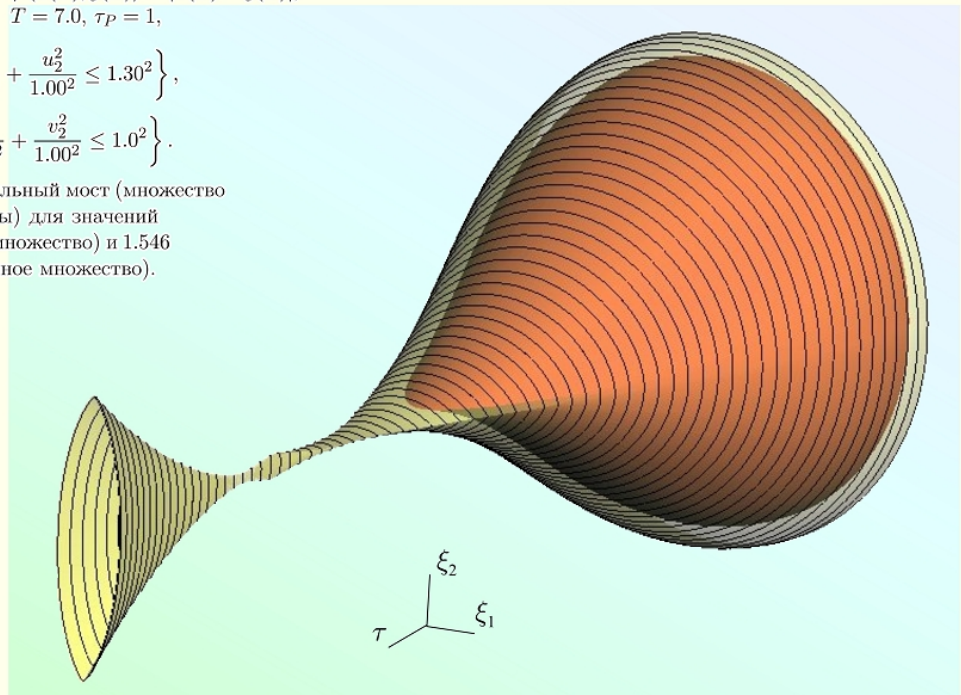


Рис. 1-4: Система визуализации построения максимальных стабильных мостов в линейных дифференциальных играх.

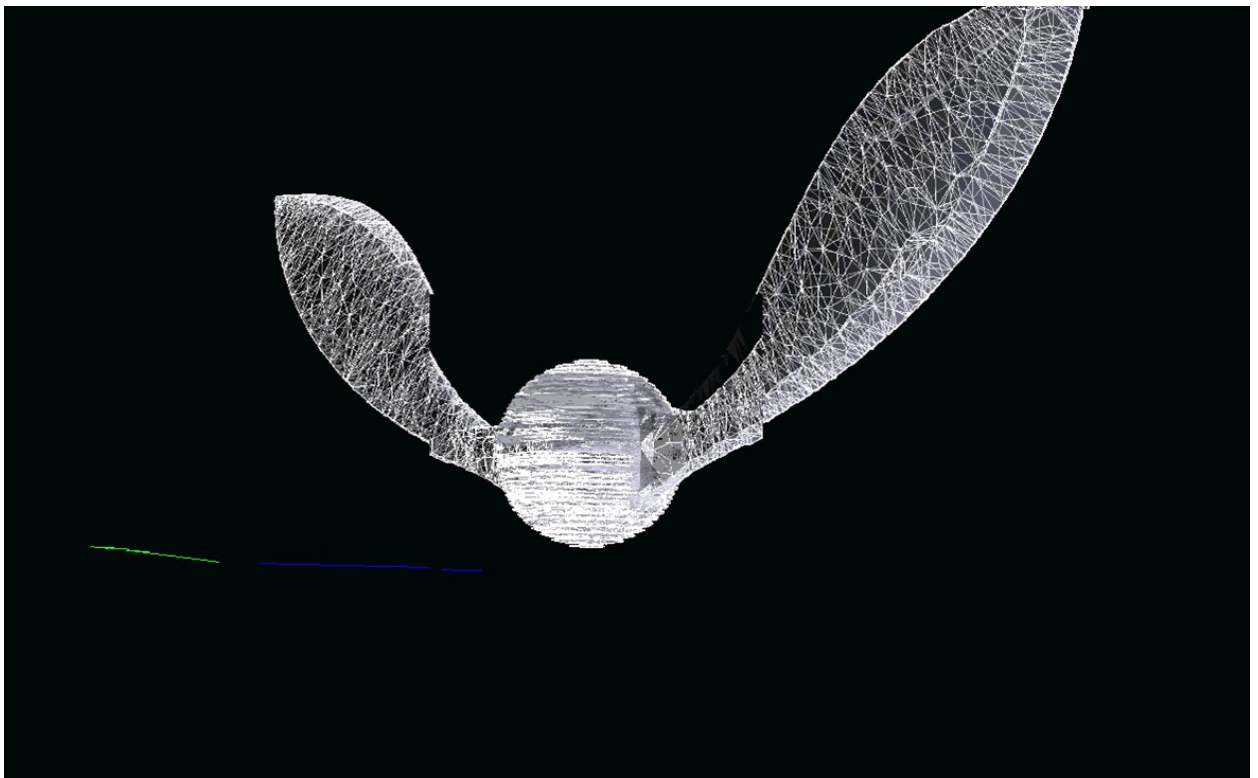


Рис. 5: Визуализация области достижимости в одной из задач оптимального управления.

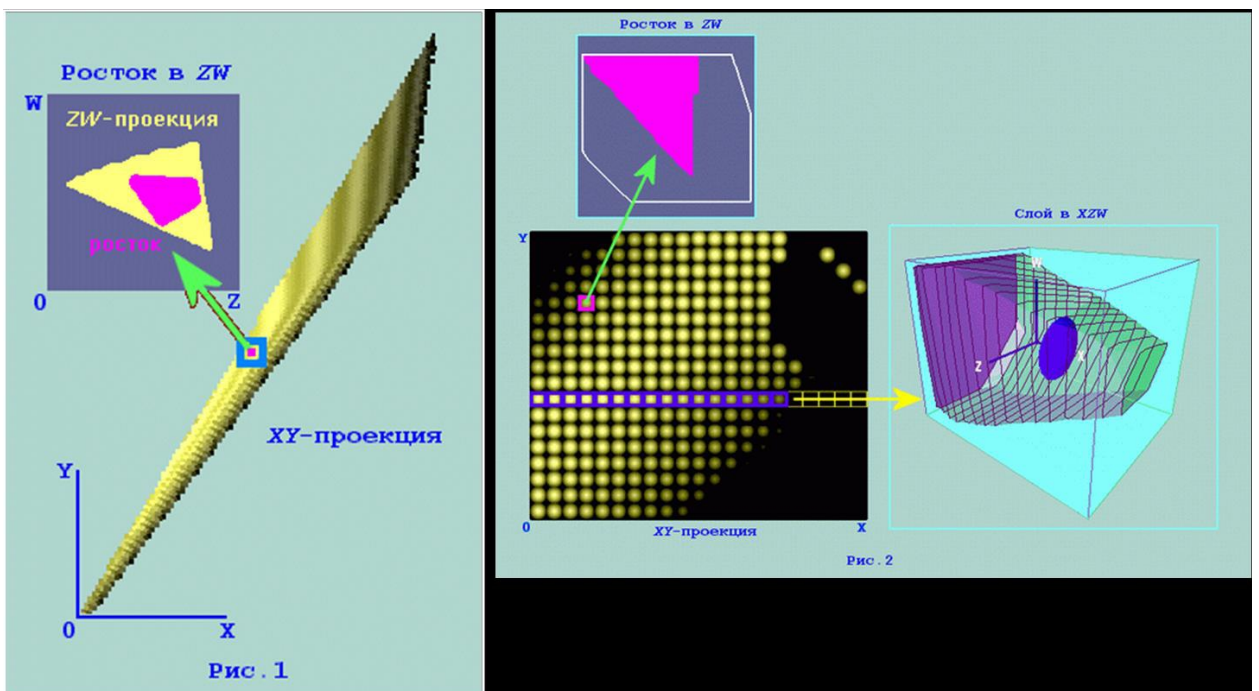


Рис. 6: Визуализация четырехмерных информационных множеств.

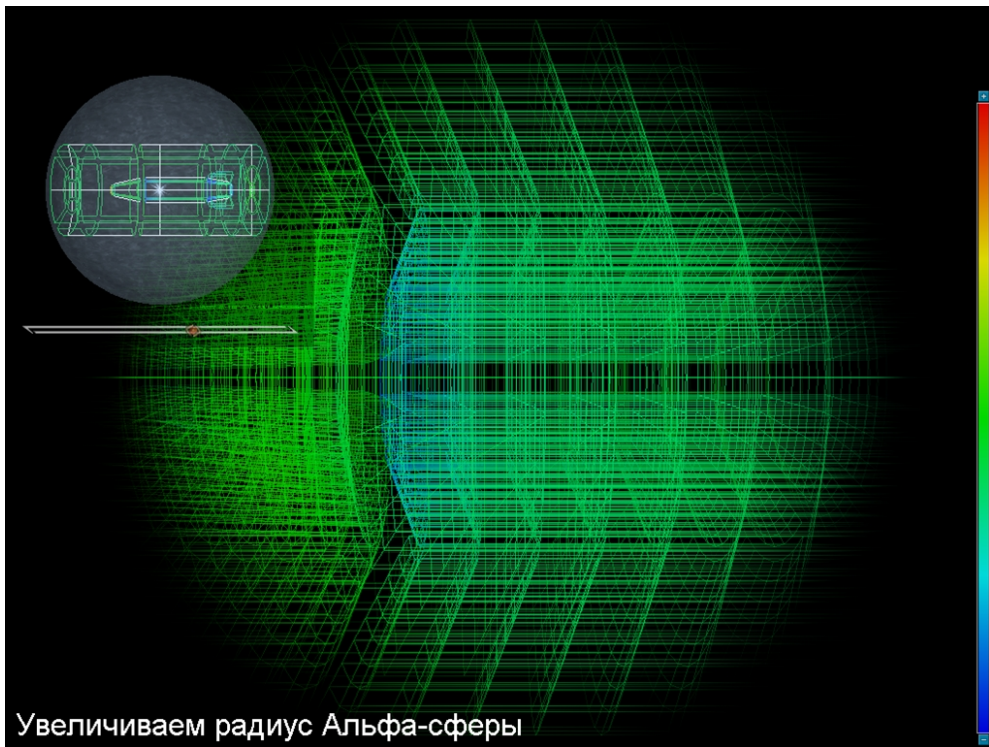


Рис. 7: Использование метафоры «альфа-сферы».

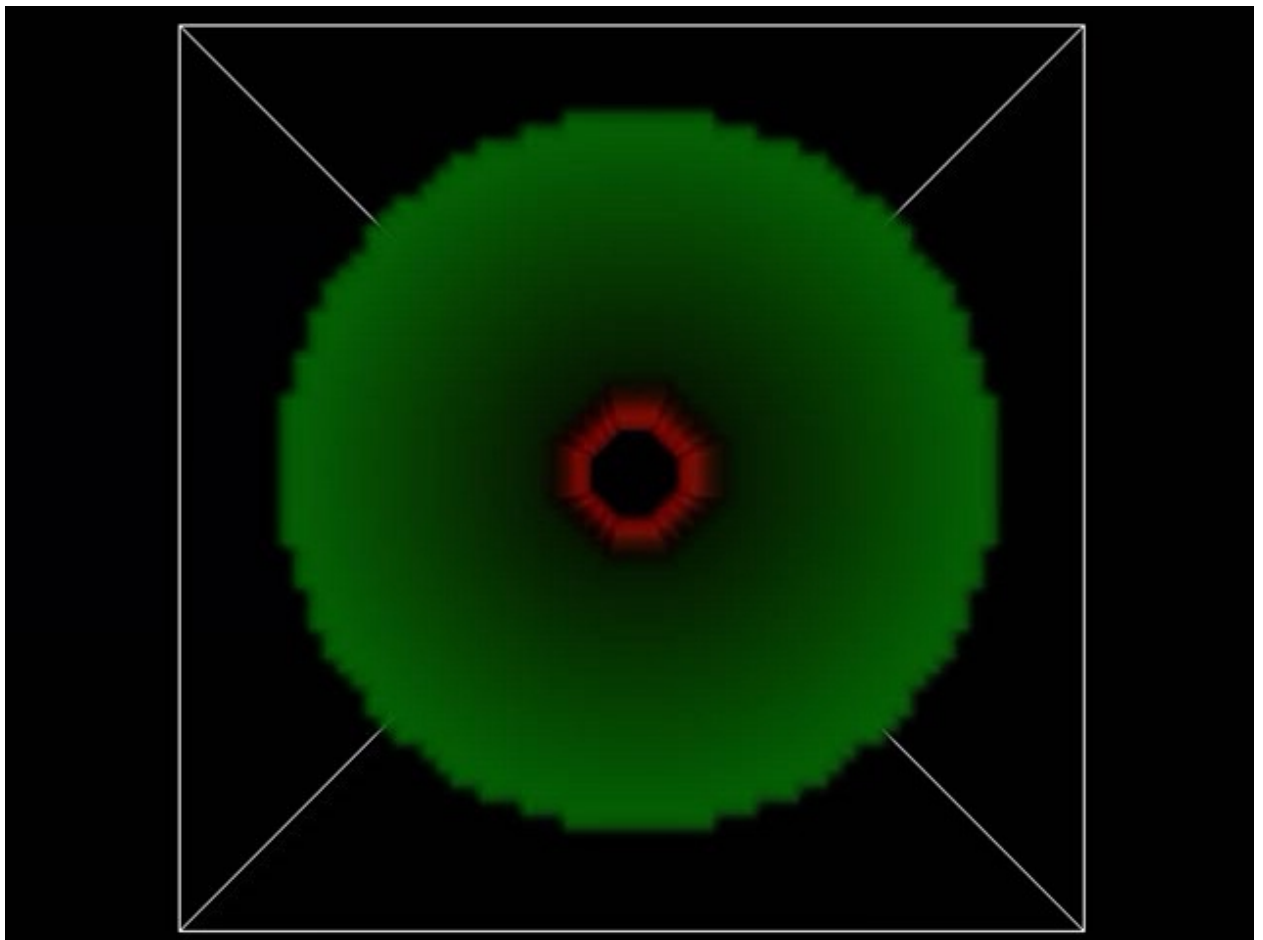


Рис. 8: Использование воксельной графики.

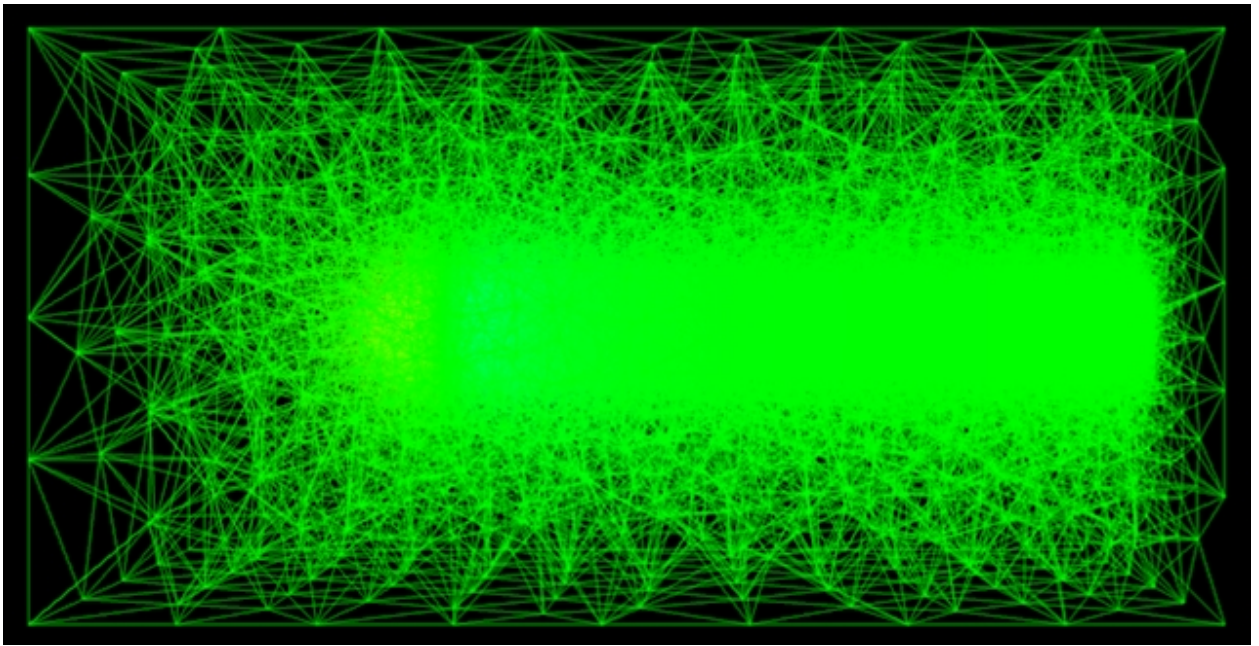


Рис. 9: Отображение тетраэдральных сеток. Объем сетки 70300 точек. Сетка целиком.

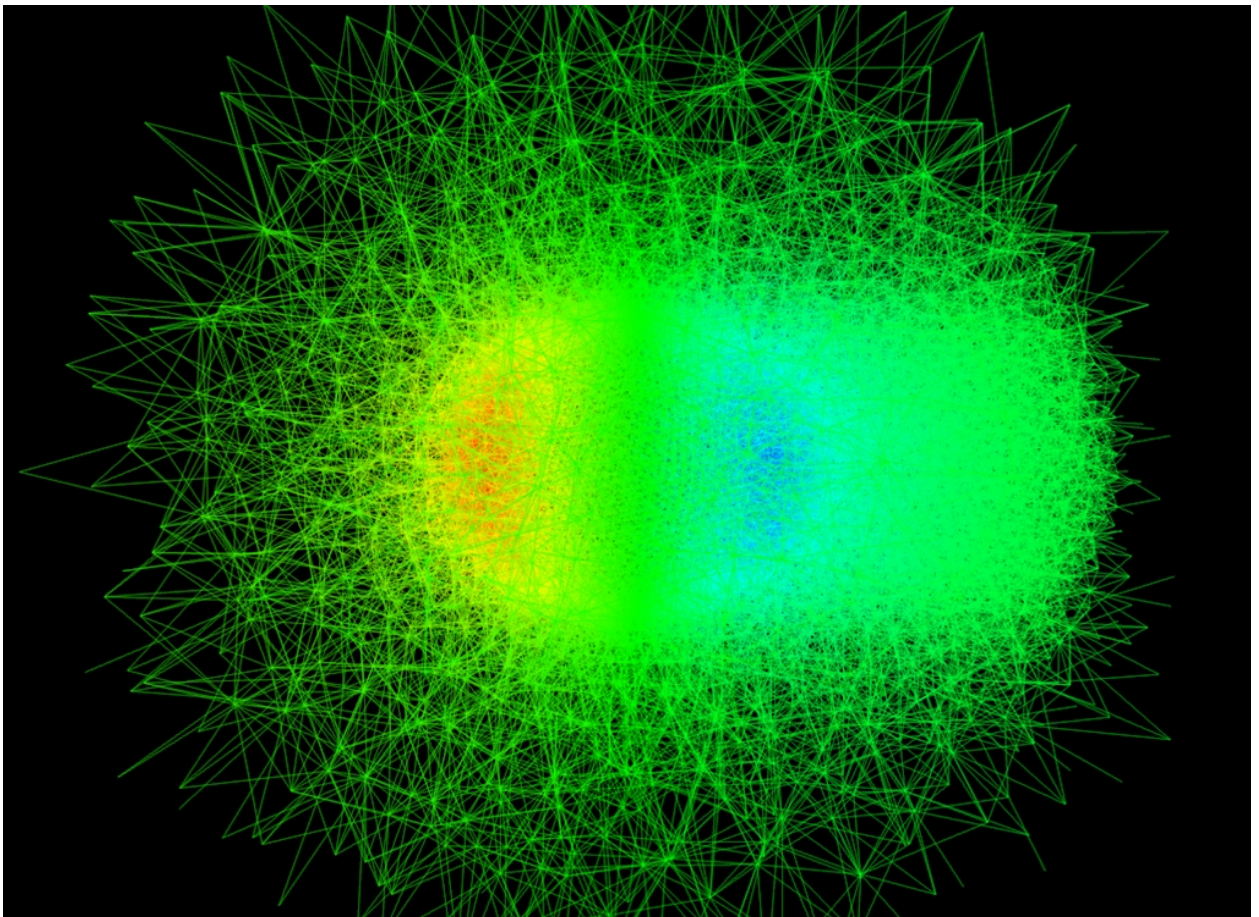


Рис. 10: Отображение тетраэдральных сеток. Участок тетраэдральной сетки объемом 70300 точек. Отображаются только точки попавшие в сферу заданного радиуса. Поток движется на сферу, цветом показано давление.

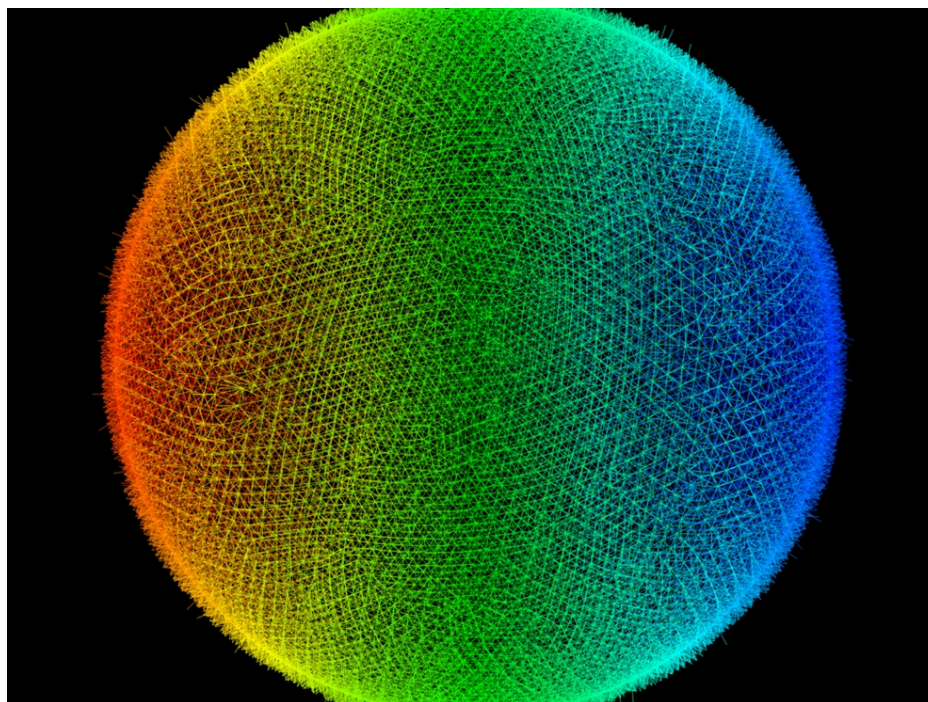


Рис. 11: Отображение тетраэдральных сеток. Участок тетраэдральной сетки рядом со сферическим телом. Общий объем сетки 546266 точек. Поток двигается на сферу, цветом показано давление.

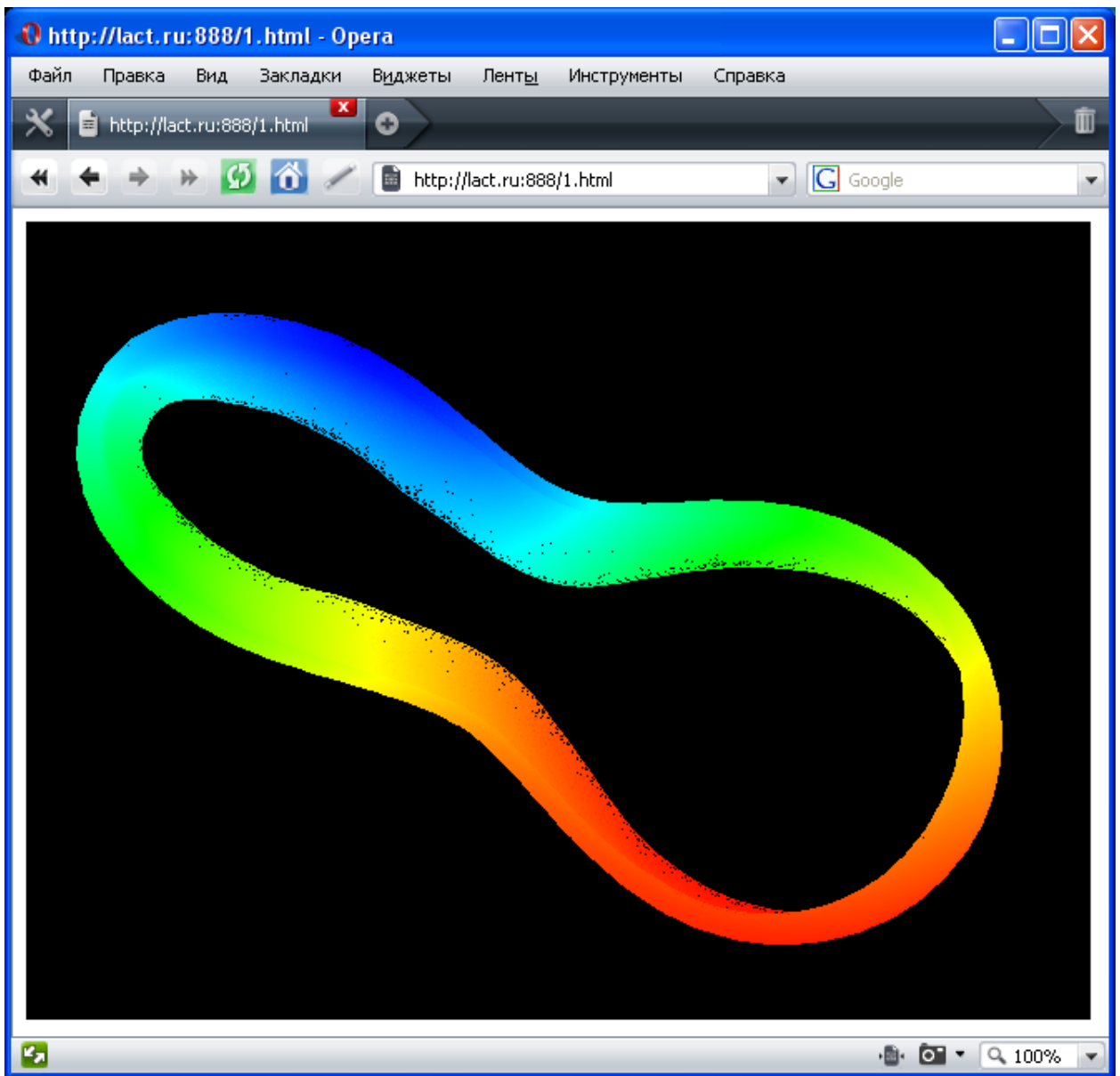
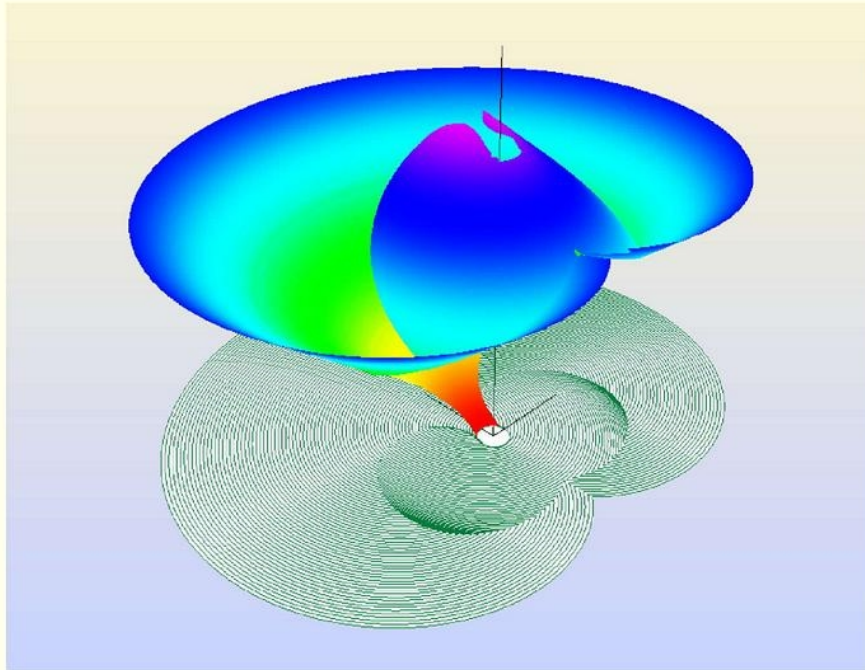


Рис. 12: Пример визуализации данных, полученных в результате работы пакета DEFORM при помощи системы удаленной визуализации.

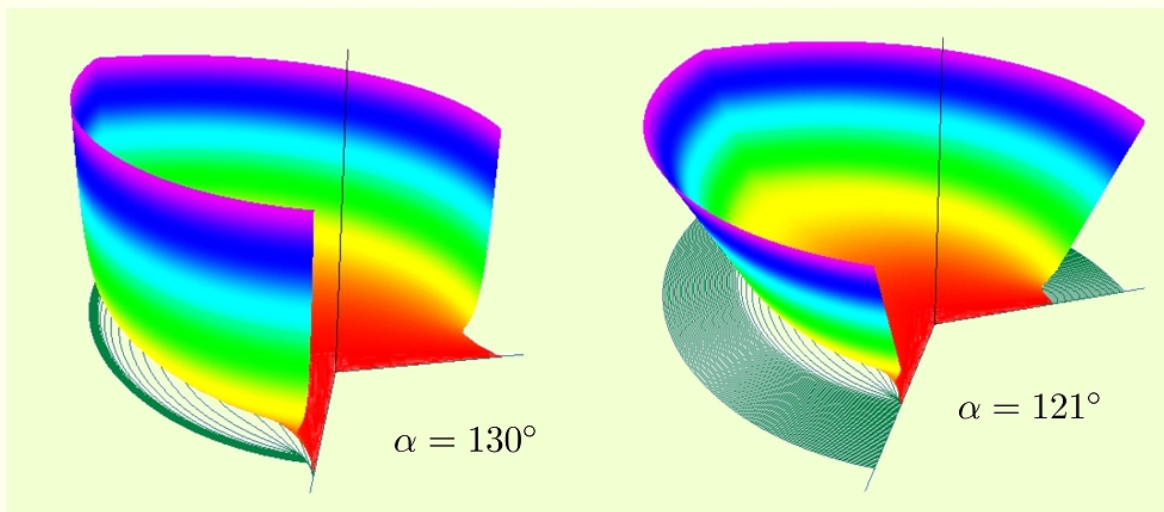


ИГРА „ШОФЕР-УБИЙЦА“
ГРАФИК ФУНКЦИИ ЦЕНЫ

$$\begin{aligned}\dot{x} &= -wyu/R + v_1, \\ \dot{y} &= wxu/R + v_2 - w,\end{aligned}$$

$$|u| \leq 1, |v| \leq \nu, v = (v_1, v_2).$$

Параметры задачи: $R = 3, \nu = 1, w = 3$,
радиус терминального круга $r = 1$.



ФУНКЦИЯ ЦЕНЫ
В ИГРЕ СОПРОВОЖДЕНИЯ-УКЛОНЕНИЯ

$$\begin{aligned}\dot{x} &= -wyu/R + v_1, \\ \dot{y} &= wxu/R + v_2 - w,\end{aligned}$$

$$|u| \leq 1, |v| \leq \nu, v = (v_1, v_2).$$

Управление u пытается удержать систему как можно дольше в невыпуклом конусе обнаружения, цель управления v противоположна.
Параметры задачи: $\nu = 1, R = 1, w = 1.7$.
Величина α — полуугол невыпуклой зоны обнаружения.

Рис. 13-14:- графики функции цены дифференциальной игры в виде поверхности в трехмерном пространстве

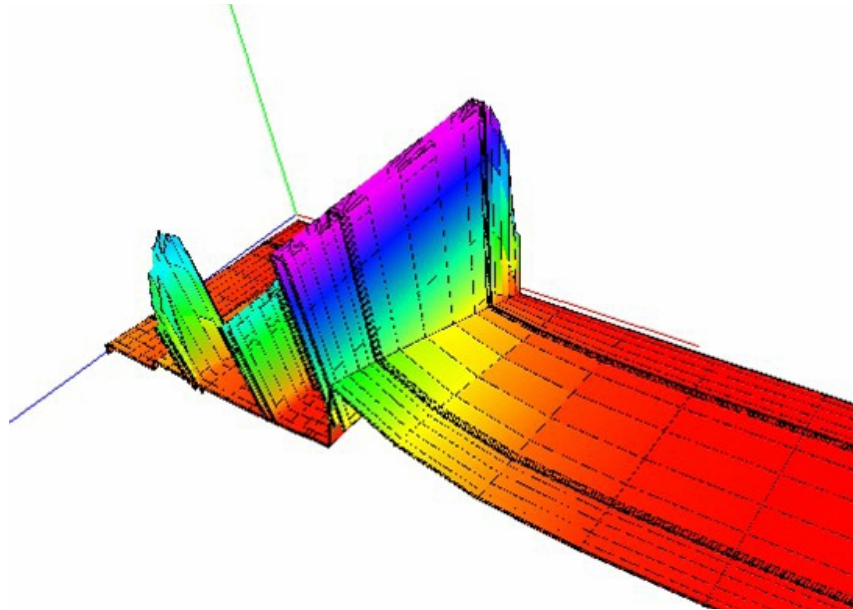


Рис. 15: Пример совмещения на одном графике небольших (фоновых) значений и очень больших всплесков.

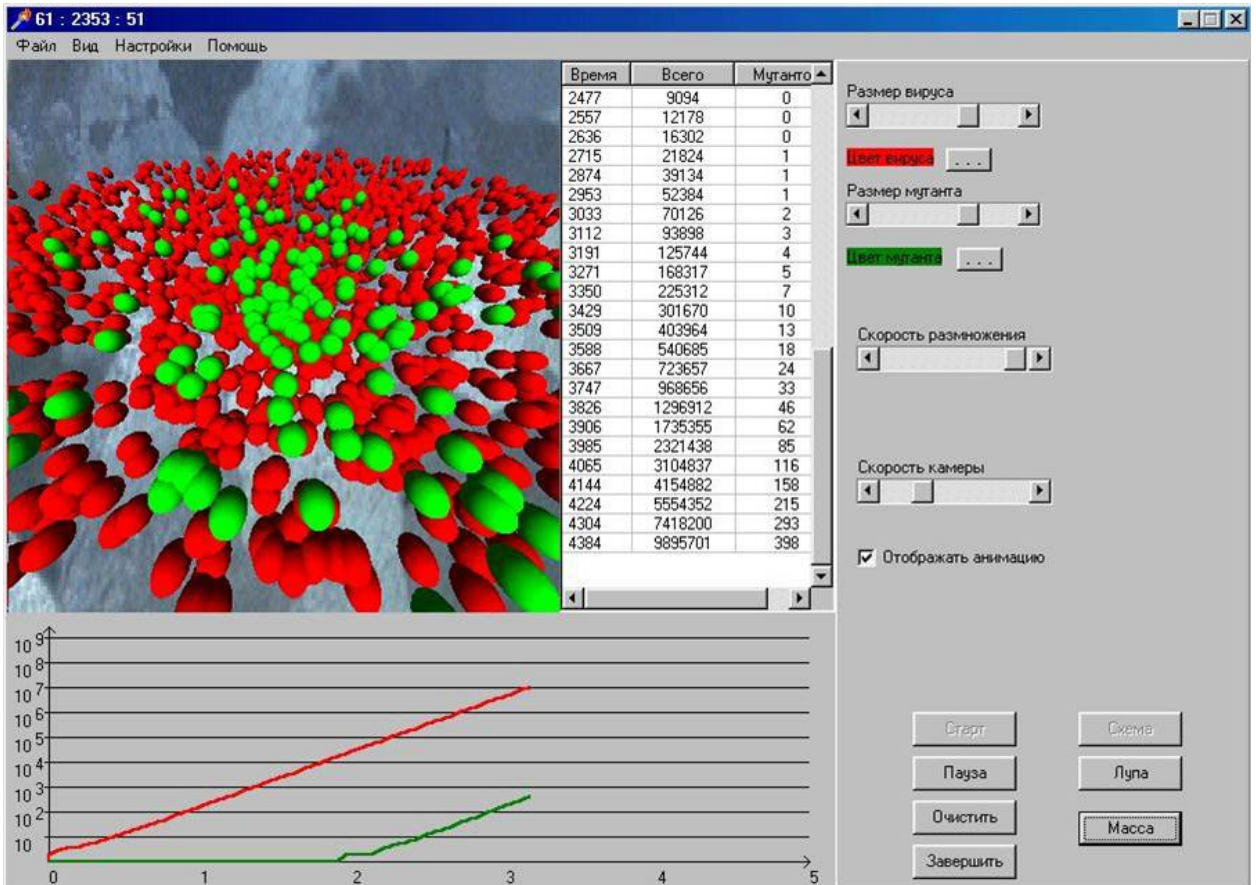


Рис. 16: Система визуализации кинетики размножения и мутации вирусов.

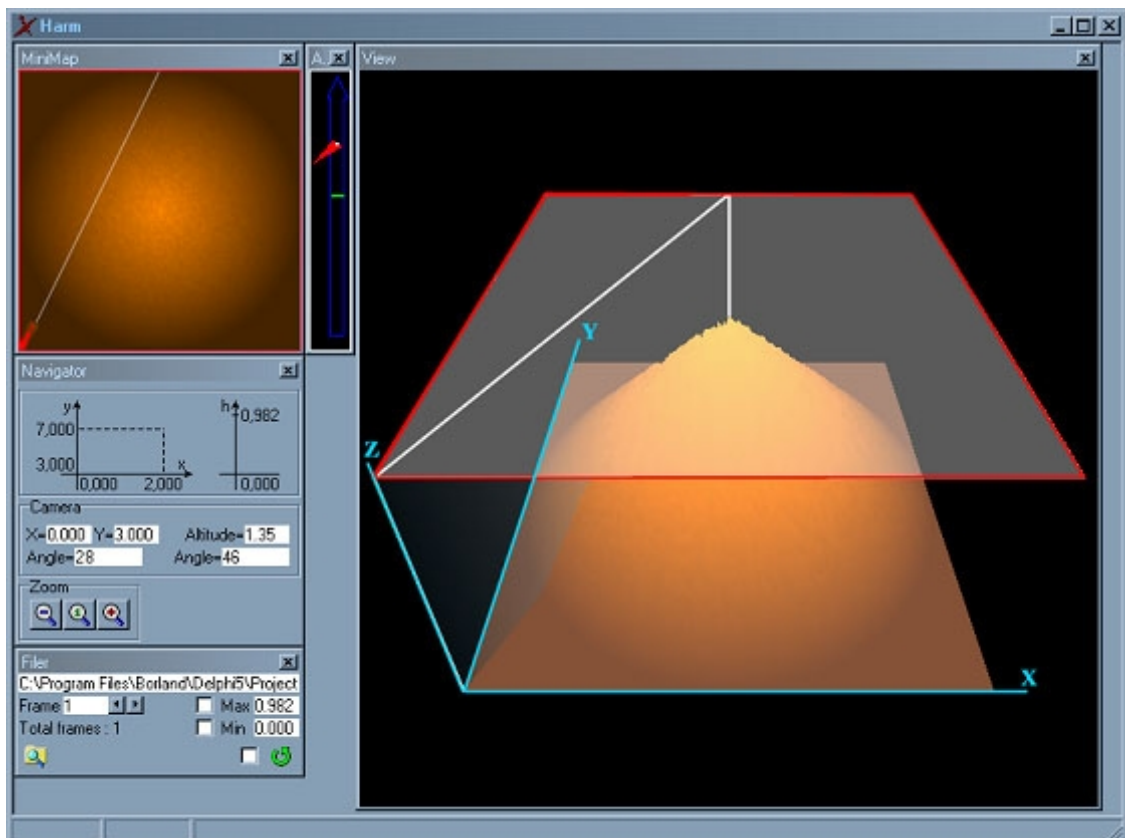


Рис. 17: «Двухоконный» интерфейс в системе визуализации моделирования загрязнения окружающей среды.