

Институт философии РАН  
Кафедра истории и философии науки

Институт системного программирования РАН

## РЕФЕРАТ

по истории и философии науки

### **История визуализации**

Специальность

05.13.11 Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей

Выполнил:

Шуткин Василий Николаевич, аспирант

Научный руководитель:

Семёнов Виталий Адольфович, д.ф.-м.н., проф.

Руководитель семинара:

Лепский Владимир Евгеньевич

Москва

2018

## Содержание

Введение.....	3
Понятие визуализации.....	3
История визуализации.....	5
Визуализация до появления компьютера.....	6
Витрувианский человек.....	6
Первые диаграммы.....	6
Первая геологическая карта Великобритании.....	7
Карта Джона Сноу со случаями холеры.....	8
Диаграмма Флоренс Найтингейл «петушиный гребень».....	9
Карта вторжения Наполеона в Россию.....	10
Диаграмма Гантта.....	11
Карта Лондонского метрополитена.....	11
Ящик с усами.....	12
Визуализация с появлением компьютера.....	13
Статистика и анализ данных.....	14
Визуализация фракталов и абстрактная графика.....	15
Использование компьютерной графики в визуализации.....	16
Рендеринг поверхностей.....	17
Построчный рендеринг.....	17
Z-буферизация.....	18
Рейкастинг и рейтрейсинг.....	19
Метод излучательности.....	21
Заключение.....	22
Список литературы.....	23

## **Введение**

В данной работе будет приведён анализ истории науки визуализации.

Коротко, визуализацию можно определить как создание визуальных изображений или процесс интерпретации информации в терминах визуального представления или представление информации в визуальной форме.

Идея визуализации не является новой, на протяжении всей истории человечества можно найти множество различных примеров использования визуализации. Однако именно в последнее время визуализация вызывает большой интерес благодаря развитию компьютерных технологий и возникновению компьютерной графики, которая сегодня является основным средством визуализации, при этом предоставляя широчайшие возможности для наглядного представления информации, недоступные ранее человечеству.

## **Понятие визуализации**

В последнее время визуализацию часто не представляют без компьютерных технологий, поэтому определение визуализации часто связывают именно с компьютерной обработкой данных и их отображением средствами компьютера.

Также следует отметить, что сегодня важнейшей областью, наиболее заинтересованной в средствах и методах визуализации является наука, поэтому когда говорят о визуализации, часто говорят именно о научной визуализации.

Приведём ниже несколько различных определений визуализации, раскрывающих смысл этого понятия, а также необходимость визуализации для развития современной науки.

Визуализация — это инструмент или метод интерпретации данных изображения, помещаемых в компьютер, а также генерации изображений из сложных многомерных наборов данных. Визуализация — это метод вычислений. Он преобразует символическое представление в геометрическое, позволяя исследователям наблюдать свои модели и вычисления. Визуализация предлагает метод, который позволяет увидеть невидимое. Она обогащает процесс научного открытия и стимулирует глубокие и неожиданные озарения. Во многих областях она кардинальным образом изменяет то, как учёные делают науку. [1]

Научная визуализация обеспокоена рассмотрением данных и информации таким способом, чтобы обрести понимание и постижение смысла данных.

Целью научной визуализации является продвижение более глубокого уровня понимания рассматриваемых данных и стимулирование новых постижений фундаментальных процессов, полагаясь на мощнейшую способность человека мысленно представлять. Существует несколько примеров, когда инструменты и методы визуализации использовались для анализа и отображения больших объёмов, зачастую изменяющихся во времени, многомерных данных в таком виде, который позволял пользователю извлечь значительные особенности и результаты легко и быстро. [2]

Необходимость визуализации для современной науки хорошо объясняет цитата из статьи Р. Фридриха и Т. Кили [3]: «Обычным аргументом в пользу продвижения научной визуализации является то, что сегодня исследователи должны потреблять всё большие объёмы чисел, которые хлынули, словно из пожарного шланга, из симуляций на суперкомпьютерах и высокопроизводительных научных инструментов. Если исследователи попытаются читать эту информацию, обычно представленную как огромные числовые матрицы, они будут брать информацию в темпе улитки. Однако, если информация отображена графически, они смогут усваивать её в гораздо более высоком темпе».

Согласно Е. Ингатиус и Х. Сенай, визуализация научных данных поддерживает учёных и их взаимоотношения, доказательства или опровержения гипотез, и открывает новые феномены используя графические методы. Главной целью визуализации данных является получение понимания пространства информации путём отображения данных в графические примитивы. [4]

Роберт Б. Хабер и Дэвид А. МакНабб определили визуализацию как использование технологии создания изображений на компьютере как инструмента для понимания данных, полученных в результате симуляции или физического измерения. В их понимании технология визуализации основана на интеграции множества технологий, таких как компьютерная графика, обработка изображений, компьютерное зрение, геометрическое моделирование при автоматизированном проектировании, теория аппроксимаций, психология восприятия и исследования пользовательских интерфейсов. [5]

В основе концепции визуализации лежит идея о том, что наблюдатель способен построить мысленную модель, визуальные атрибуты которой соответствуют атрибутам данных в определяемой манере. Это поднимает следующие вопросы:

- Какие мысленные модели наиболее эффективно несут в себе различные типы информации?

- Какие определяемые и узнаваемые визуальные атрибуты этих моделей являются наиболее полезными для передачи определённой информации как независимо, так и в сочетании с другими атрибутами?
- Как нам наиболее эффективно вызвать выбранные мысленные модели в сознании наблюдателя?
- Как нам предоставить указания по выбору подходящих моделей и их атрибутов человеку или автоматизированному проектировщику отображения?

Выбор подходящего представления может предоставить ключ к критическому всеобъемлющему пониманию данных, тем самым улучшая последующий анализ, обработку и принятие решений. [6]

Следует ожидать, что размеры, размерность и количество параметров наборов данных будут значительно расти. Это сопровождается соответствующим увеличением сложности моделируемых систем. Многие методы компьютерной графики и обработки изображений применимы к визуализации этих данных, а также появляются новые способы представления и взаимодействия с данными. Наша способность задействовать эти методы ограничена отсутствием систематических стратегий, которые, учитывая как характеристики данных, так и интерпретационные цели учёного, могли бы помогать учёному в их использовании.

Наша цель — это систематическая, а поэтому и потенциально автоматическая, генерация визуальных представлений, при условии что даны все важные характеристики данных и специфицированы интерпретационные цели пользователя. Интерпретационные цели определяют какие характеристики данных или связи между переменными данных пользователь хочет проанализировать с помощью визуального представления. [7]

## **История визуализации**

В данной главе будет рассмотрена история визуализации. На самом деле, историю визуализации удобно разделить на две эпохи. Изобретение компьютера оказало огромное влияние на жизнь людей, развитие науки и технологий, но сильнее всего оно повлияло на представление людей о визуализации. Визуализация как наука обрела свой облик именно с появлением автоматических средств обработки и отображения информации, поэтому удобно

рассматривать историю визуализации в два этапа: до появления компьютера, и после.

## Визуализация до появления компьютера

На протяжении практически всей истории, человечество активно использовало визуализацию в виде плоских рисунков, будь то географические карты, чертежи или графики.

Рассмотрим наиболее яркие примеры визуализации в истории человечества.

### Витрувианский человек

Знаменитый рисунок Леонардо да Винчи был создан примерно в 1490-е годы. Он выполнен пером и чернилами на бумаге и изображает мужчину в двух наложенных друг на друга позициях, вписанную в окружность и в квадрат. Этот рисунок основан на связи пропорций идеального человеческого тела с геометрическими формами, описанной античным римским архитектором Витрувием. Рисунок и пояснения к нему иногда называют «каноническими пропорциями» или «пропорциями человека». Он считается одновременно научным трудом и произведением искусства.

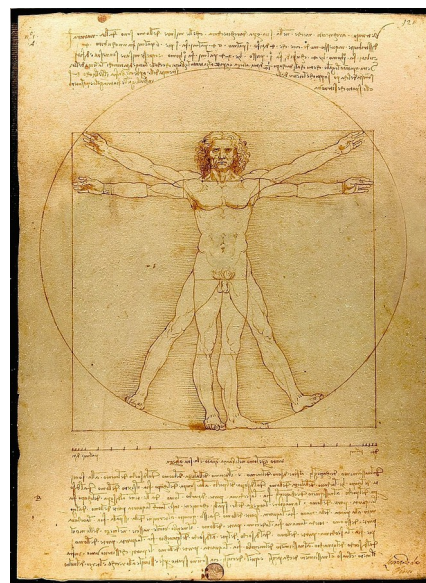


Рисунок 1: Витрувианский человек Леонардо да Винчи

Данный рисунок можно считать ярким примером визуализации информации. Согласно Биллу Ферстеру [8], данный рисунок напрямую передает связь пропорций идеального человека, используя фигуру человека, вписанную в идеальный круг.

### Первые диаграммы

Изобретателем первых диаграмм был шотландский инженер и политэконом Уильям Плейфэр (22 сентября 1759 года — 11 февраля 1823 года). Его обычно считают основателем графических методов статистики. Он изобрёл четыре типа диаграмм. В 1786 году он опубликовал первые графики — линейчатый график и гистограммы для

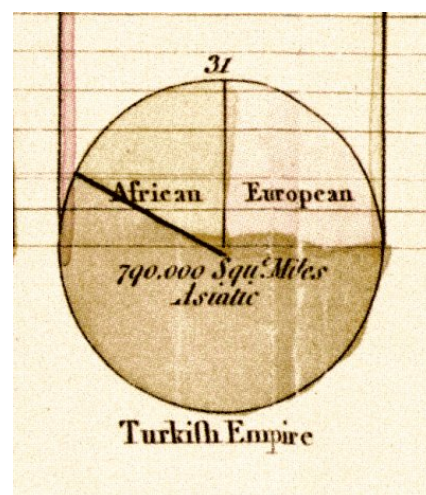


Рисунок 2: Круговая диаграмма Плейфэра, показывающая пропорции частей Османской империи, расположенных в Азии, Европе и Африке до 1789



представления экономических данных, а в 1801 — секторную диаграмму в круге и круговую диаграмму [9].

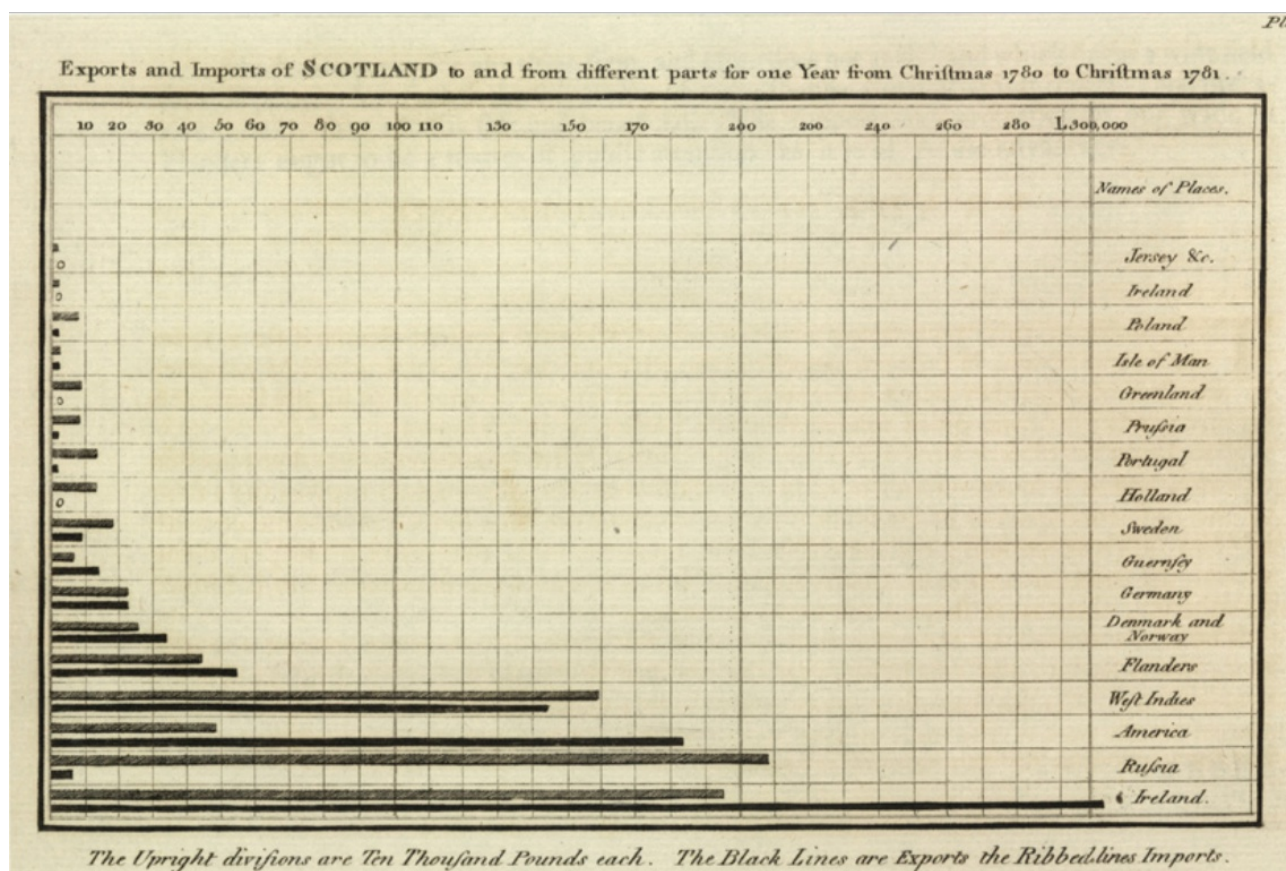


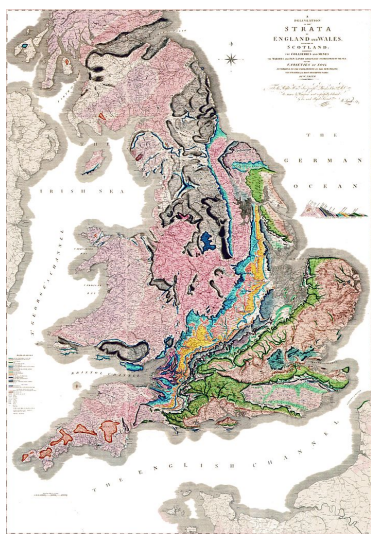
Рисунок 3: Гистограмма Плейфэра, показывающая объёмы импорта и экспорта Шотландии за 1781 год

В 18 веке, для представления больших объёмов численных данных как правило использовались таблицы. Билл Ферстер [8] отмечает, что графики, гистограммы и диаграммы Плейфэра предоставили возможность представить табличные данные в более простой, понятной и быстрой для понимания форме, чем сами таблицы.

### Первая геологическая карта Великобритании

Первые подобиия карт люди создавали ещё за многие тысячелетия до нашей эры. Известны примеры наскальных рисунков, на которых первобытные люди изображали горы, реки, озёра и свои маршруты. Например, такие изображения, найденные в окрестностях города Павлова (Чешская Республика) были датированы приблизительно двадцать пятым тысячелетием до нашей эры. Также, историки обнаруживали карты неба, составленные первобытными людьми. Например, рисунки в пещере Ласко датируются приблизительно 16500 годом до нашей эры и изображают такие звёзды как Вега, Денеб и Альтаир (созвездие Летний треугольник), а также кластер звезд Плеяды.

Однако в контексте истории визуализации интереснее карта, созданная Уильямом Смитом (29 марта 1769 года — 28 августа 1839 года) — английским землемером, мелиоратором и картографом. В 1815 году он опубликовал первую



*Рисунок 4: Первая геологическая карта Великобритании Смита*

геологическую карту для целого региона — Англии и Уэльса. Эта была первая геологическая карта такого масштаба и такой степени детализации. Симон Винчестер в своей книге [10] называет её «картой, которая изменила мир».

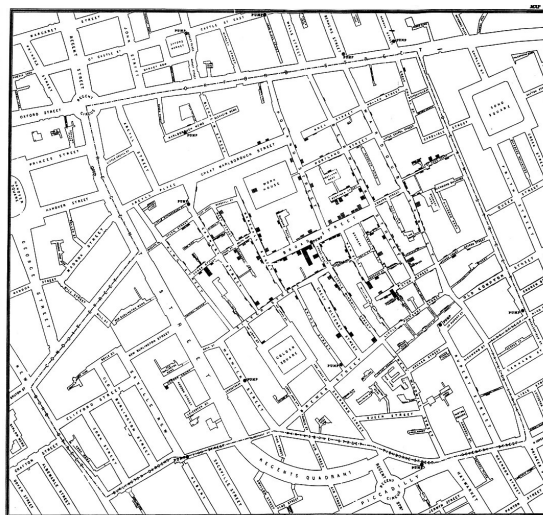
У. Смита называют «отцом английской геологии», одним из главных его открытий является то, что слои осадочных пород, которые находятся в разных районах непосредственно не связаны между собой, могут быть сопоставлены по характерным для каждого пласта наборам остатков ископаемых организмов или руководящим ископаемым.

Билл Ферстер [8] подмечает, что эта замечательная карта помогла ввести концепцию того, что карты могут использоваться не только для передачи географической информации.

### **Карта Джона Сноу со случаями холеры**

В 1854 году в Лондоне, в окрестностях улицы Брод-стрит (ныне Бродвик-стрит) произошла серьёзная вспышка эпидемии холеры. В течение всего нескольких недель погибли сотни людей. Это событие вошло в историю благодаря действиям врача Джона Сноу, который изучил эту вспышку эпидемии и установил, что её причиной является заражённая вода.

В те времена господствовала «теория миазмов», согласно которой причиной холеры был нездоровый воздух. Джон Сноу скептически относился к этой теории. Опросив местных жителей, он пришёл к выводу, что источником заражения является водозаборная колонка на Брод-стрит. Он со всей настойчивостью смог убедить местные власти снять с колонки рукоять насоса. Вспышка эпидемии пошла на спад.



*Рисунок 5: Карта Сноу со случаями смерти от холеры*



При этом он не смог определить опасность воды лабораторными методами, однако составил карту, на которой были отмечены места расположения водозаборных колонок и количество умерших в том или ином здании. Он использовал статистические методы и расчёты подтвердили его предположения. Изучая свою карту, он получил диаграмму Вороного, на которой наибольшее число умерших было в окрестности колонки на Брод-стрит. [11]

### Диаграмма Флоренс Найтингейл «петушиный гребень»

Флоренс Найтингейл (12 мая 1820 года — 13 августа 1910 года) — сестра милосердия и общественная деятельница Великобритании. Она была пионером в наглядном представлении информации и статистических графиков. Она активно использовала круговые диаграммы, изобретённые Уильямом Плейфэром в 1801 году, однако в те времена всё ещё не являвшиеся обычным способом представления данных. При этом она усовершенствовала их, и называла «петушиный гребень» (англ. *coxcombs*).

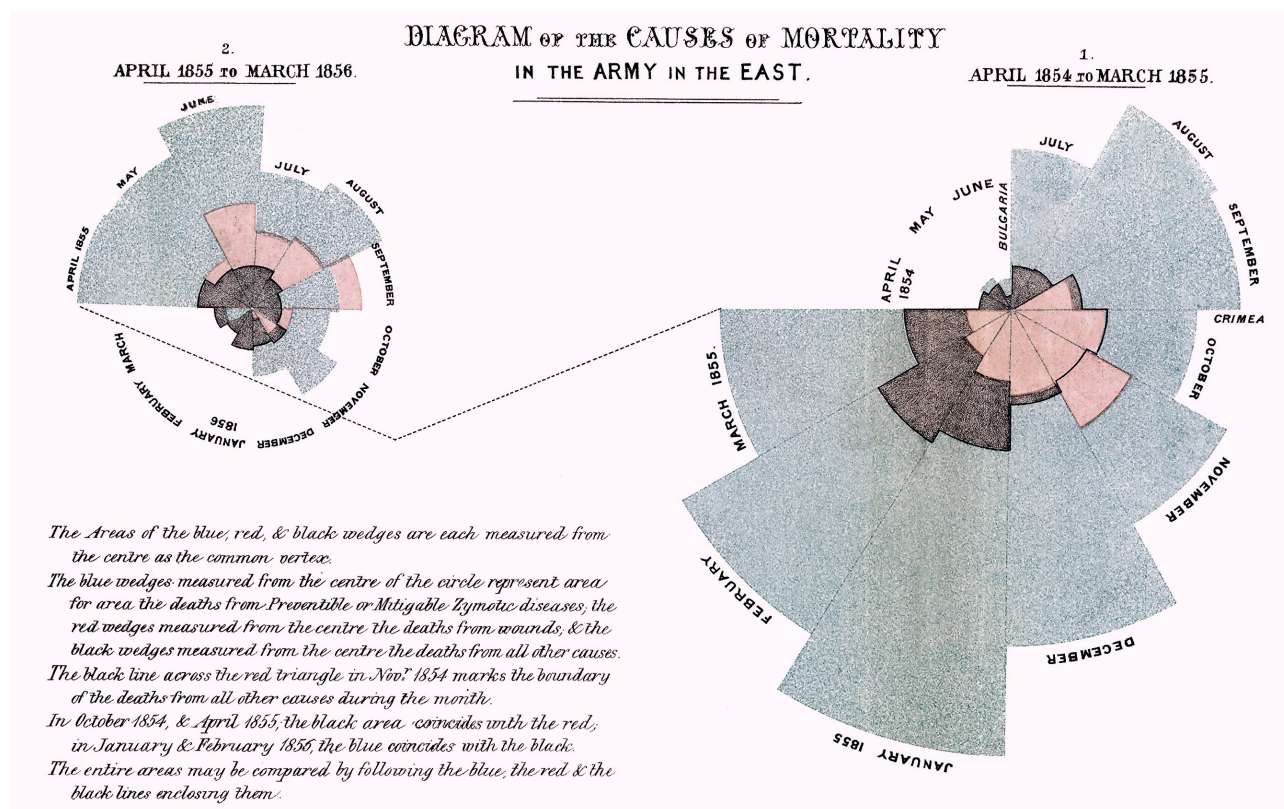


Рисунок 6: Диаграмма Найтингейл, показывающая смертность солдат во время крымской войны. Каждый сектор соответствует одному месяцу. Площадь каждого сектора пропорциональна смертности. Голубым цветом показана смертность от болезней, красным — от ран, чёрным — от других причин

Эти диаграммы она использовала для того чтобы показать количество смертей в крымской войне, которых можно было бы избежать. Диаграммы изображали сезонные источники смертности пациентов в военном госпитале, в котором она работала. Они приводились в отчетах об условиях медицинского обслуживания



- названия ключевых мест, в которых находилась армия;
- температура воздуха во время отступления.

Эдвард Тафти, известный своими работами по информационному дизайну и визуализации данных, в своей книге [13] говорит об этой работе: «Вполне возможно, что это самый лучший статистический рисунок из когда либо нарисованных».

## Диаграмма Гантта

Генри Гантт (20 мая 1861 года — 23 ноября 1919 года) — американский инженер, соратник основоположника научной организации труда и менеджмента Фредерика Тейлора, автор более 150 публикаций и более десятка изобретений. Самым известным его изобретением является диаграмма Гантта — тип столбчатых диаграмм, который используется для иллюстрации плана или графика работ по какому-либо проекту. Первый формат диаграммы был разработан Ганттом в 1910 году.

Диаграмма Гантта состоит из задач, которые необходимо выполнить, перечисленных по вертикальной оси и интервалов времени, отложенных по горизонтальной оси. Каждой задаче соответствует полоса, ширина этой полосы определяет длительность задачи. Диаграмма Гантта показывает время начала и конца выполнения каждой задачи. Современные виды также содержат зависимости и связи между задачами.

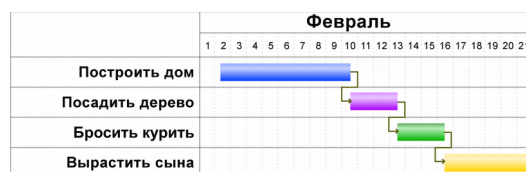


Рисунок 8: Пример диаграммы Гантта

Первые диаграммы рисовались на бумаге, и их приходилось полностью перерисовывать при изменении плана. С появлением компьютера эта проблема ушла, и в 1999 диаграммы Гантта были признаны одними из самых широко используемых инструментов для планирования проектов и управления [14].

## Карта Лондонского метрополитена

Генри Бек (4 июня 1902 года — 18 сентября 1974 года) — английский технический чертёжник, ставший известным благодаря созданию карты Лондонского метрополитена.

Он работал над этой картой в свободное от работы время (в Офисе сигналов Лондонского метрополитена). При создании этой карты он игнорировал реальные расстояния между остановками, а также реальное географическое размещение станции, линий и их точек пересечений. Он стремился сделать

карту, по аналогии с чертежами электрических схем и цепей, более приемлемой для пассажиров и более информативной.

Лондонский метрополитен изначально отнёсся скептически к радикальному предложению Бека, но всё же предложил его публике в виде небольшого памфлета в 1933 году. Эта концепция немедленно обрела популярность и стала использоваться по всему свету для иллюстрации транспортных сетей.



Рисунок 9: Карта Лондонского метрополитена, созданная Генри Беком

### Ящик с усами

Джон Тьюки (16 июня 1915 — 26 июля 2000) — американский математик, являющийся одной из ключевых фигур, внёсших вклад в формирование современной визуализации. В своей знаменательной работе [17] он призывает рассматривать анализ данных как самостоятельное направление в статистике, отдельное от математической статистики.

Вскоре, он начинает изобретать новые, простые и эффективные способы представления данных. Одним из таких способов является ящик с усами — график, использующийся в описательной статистике и способный компактно описать одномерное распределение вероятностей [15].

Этот график был изобретён Джоном в 1970-х годах и является очень простым для понимания, поэтому часто используется в различных публикациях для визуализации данных. Он наглядно отображает следующую информацию:

- границами ящика служат нижний и верхний квартили (первый и третий квартили);
- линия внутри ящика является медианой (второй квартиль);
- если нужно, в середине ящика можно показать среднее значение;

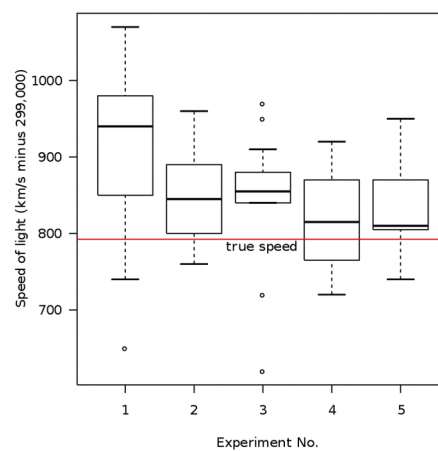


Рисунок 10: Ящик с усами для эксперимента Майкельсона-Морли, исследующего зависимость скорости света от направления



- усы — края статистически значимой выборки (без выбросов), они могут выбираться различными способами, например, как минимальное и максимальное наблюдаемые значения данных по выборке.

Данный график может показаться более примитивным, чем гистограмма, однако он имеет некоторые преимущества: он занимает мало места и удобен при сравнении распределений нескольких групп или наборов данных.

Рост Тьюки как статистка и его его подход к анализу данных с визуальной и неформальной стороны оказали огромное влияние, так же как и его изобретения.

## **Визуализация с появлением компьютера**

Самые первые компьютеры создавались и использовались для проведения научных расчётов. Самым первым применением компьютерной графики также была наука. В ранние годы, однако, вычислительные машины были недостаточно мощными для генерации сложных изображений, что существенно ограничивало возможности и сферы применения компьютерной графики. Можно считать, что повышенный интерес к визуализации начинается в 1980-х годах, с выходом таких публикаций, как [1]. С тех пор проводились различные конференции и семинары спонсируемые IEEE и ACM SIGGRAPH, посвящённые общим понятиям визуализации, визуализации информации и научной визуализации, а также другим связанным областям.

Визуализация стала предметом исследований и стала широко применяться в коммерческих программных продуктах, начиная от приложений с функциональностью электронных таблиц и возможностью построения графиков, и заканчивая сложными системами автоматизированного проектирования. Большое влияние на развитие производительности графического аппаратного обеспечения и его возможностей оказали компьютерные игры.

Как отмечает Ферстер [8], приход компьютеров, способных рисовать сложную графику, предоставил возможности и для дизайнеров, и для статистиков экспериментировать с новым средством выражения, таким которое может отображать сложную графику на основе больших наборов данных для создания богатых смыслом графических визуализаций недоступных статическим картинкам прошлых веков.

## Статистика и анализ данных

Появились высокоинтерактивные системы статистических вычислений, они управлялись посредством команд в режиме реального времени и были программируемыми. Возникли новые парадигмы прямой манипуляции данными при анализе данных: связывание, закрашивание, выделение, фокусировка и др [18]. Появились новые методы визуализации многомерных, дискретных и категоризированных данных. Усилилось внимание к аспектам восприятия и распознаваемости отображения данных.

С 1970-х по 1980-е годы многие достижения в статистической графике были связаны со статическими графиками для многомерных количественных данных, разрабатываемых таким образом, чтобы позволить человеку, занимающемуся анализом, видеть связи во всё более высоких размерностях. Более старые идеи методов уменьшения размерности привели к обобщениям отображений многомерного набора данных в «интересные» ракурсы низкой размерности.

Огромным толчком к развитию визуализации данных стало появление возможности применения динамических графических методов, позволяющее производить мгновенные и прямые манипуляции над графическими объектами и их свойствами. Одним из первых таких примеров была система для взаимодействия с вероятностными графиками в режиме реального времени, позволявшая выбирать параметр формы распределения и преобразования путём настройки регулятора (Фолкс, 1969 год). Первая общая система для управления данными высокой размерности, PRIM-9, была разработана Фишкеллером, Фридманом и Тьюки в 1974 году. Она предоставляла инструменты для проектирования, вращения (в трёхмерном пространстве), изолирования (выделения подмножеств) и маскирования данных вплоть до размерности 9. В 1990-х годах были разработаны ещё более общие системы динамической и интерактивной графики, объединённые с управлением данными и анализом в расширяемых вычислительных средах. [19]

Одним из примеров использования новых методов визуализации является программа Attribute Explorer, которая разрабатывалась в 1994–1998 годы

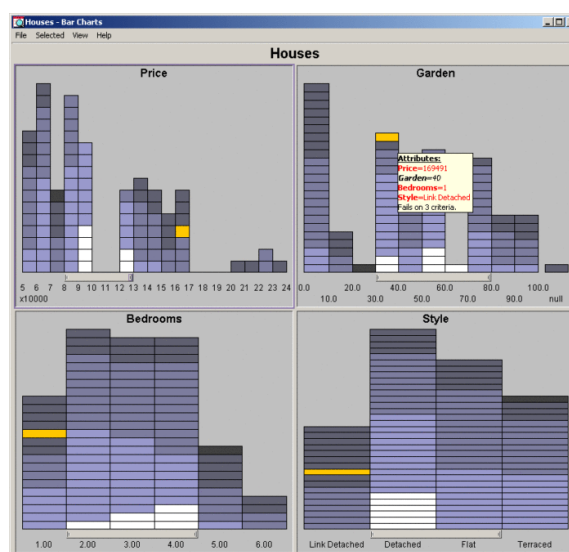


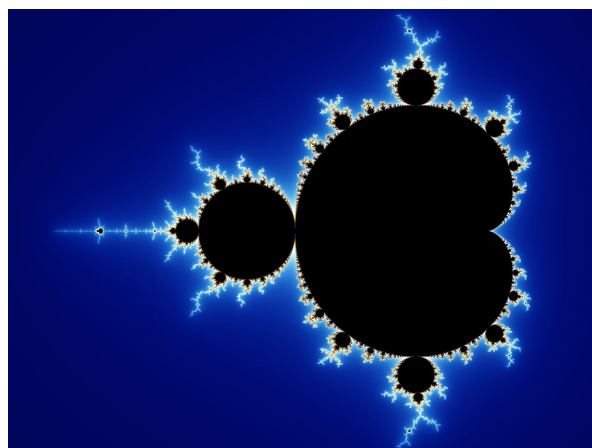
Рисунок 11: Скриншот программы Attribute Explorer. Обратите внимание на подсвеченный элемент, закрашенный также в связанных окнах

Робертом Спенсом и Лизой Твиди в Имперском колледже Лондона для исследования связей между атрибутами многомерных данных для обретения понимания. Программа состоит из связанных гистограмм, и использует метод закрашивания для осуществления немедленной обратной связи. Этот метод заключается в том, информация в нескольких окнах связана, и когда пользователь выбирает или закрашивает данные в одном окне, связанные данные закрашиваются в других окнах.

Эта техника также была применена в коммерческом продукте EZChooser, который позволял пользователям изучать набор машин и выбирать из них по нескольким параметрам, таким как производитель, цена, расход топлива и так далее.

### **Визуализация фракталов и абстрактная графика**

Производительности ранних компьютеров было недостаточно для создания сложных графических приложений, однако они уже открывали значительные возможности для создания сложных и интересных изображений. Так, например, с помощью компьютера можно визуализировать математические функции или процедурно генерировать абстрактные изображения.



*Рисунок 12: Визуализация множества Мандельброта*

История фракталов, множеств, обладающих свойством самоподобия, началась ещё в XVII веке. Математики на протяжении нескольких веков развивали теорию фракталов, однако не имели возможности визуализировать их. В 1975 году Бенуа Мандельброт подвёл итог многовековому исследованию и проиллюстрировал своё математическое определение поразительными визуализациями, созданными на компьютере [16].

Следует упомянуть, что компьютерная графика оказала влияние не только на научную сферу, но и на искусство. Вера Молнар (1924), родившаяся в Венгрии и живущая во Франции, считается одним из пионеров компьютерного искусства. Она получила художественное образование, однако с 1968 года стала работать с компьютером, создавая алгоритмические изображения, основанные на темах простых геометрических форм. Она придумала синтаксис для рисования форм, линий и цветов. В своих изображениях она обычно использует серии форм, повторяющихся упорядоченно или случайно. За свой вклад в

искусство она получила несколько наград и её работы показываются на различных выставках.

## Использование компьютерной графики в визуализации

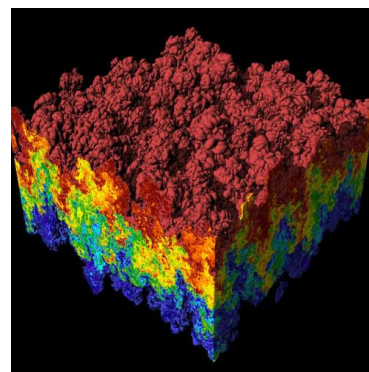
Появление компьютерной графики стало возможным благодаря развитию электроники, электротехники, появлению телевидения и экранов, использующих электронно-лучевые трубки. В 1950-х годах, такие проекты как Whirlwind и SAGE стали использовать экраны на основе лучевых трубок как устройства отображения, а также взаимодействия с пользователем. Для ввода графических данных в компьютер применялось световое перо.

Реальные прорывы в компьютерной графике произошли в 1970-е годы, сместив акценты в компьютерной графике в сторону развития её реалистичности.

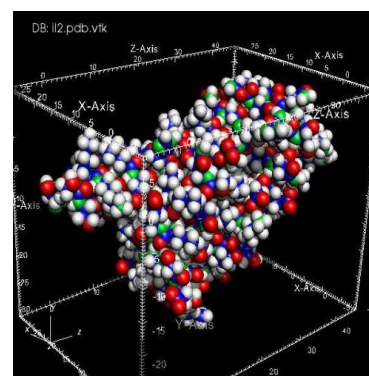
Научная визуализация с использованием компьютерной графики набирала популярность по мере того как развивались технологии компьютерной графики.

Первичными приложениями научной визуализации были скалярные и векторные поля, полученные в результате моделирования и измерений. Главными методами визуализации двумерных скалярных полей являются цветные карты и рисование изолиний. Для двумерных векторных полей используют глифы (графические иконки, такие как стрелки), линии тока или методы линейной интегральной свёртки. Двумерные тензорные поля как правило сводят к векторным полям, используя один из двух собственных векторов для представления тензора в каждой точке поля и затем визуализируя с использованием методов для векторных полей.

Для трёхмерных скалярных полей основными являются методы объёмного рендеринга и использование изоповерхностей. Для трёхмерных векторных полей, так же как и для двумерных применяют глифы, линии тока и методы линейной интегральной свёртки, а также топологические методы. Такие техники, как гиперлинии тока [20], были разработаны для визуализации двумерных и трёхмерных тензорных полей.



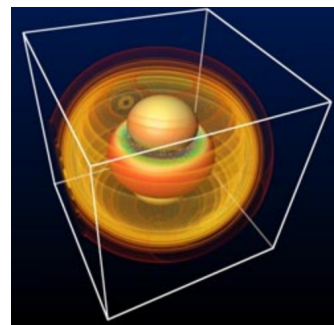
*Рисунок 13: Визуализация моделирования неустойчивости Рэля-Тейлора, вызванной смешением двух жидкостей*



*Рисунок 14: Визуализация молекул*



В науке активно используется компьютерное моделирование каких-либо систем. Оно активно используется как часть математического моделирования природных систем в физике, химии и биологии; социальных систем в экономике, психологии и социологии; а также в процессе разработки новых инженерных систем, для того чтобы понять, как они будут работать на практике. Очень важной является синхронная визуализация моделируемой системы.



*Рисунок 15:  
Визуализация  
гравитационных волн*

## **Рендеринг поверхностей**

Рендеринг — это процесс создания изображения некоторой модели посредством компьютерной программы. Модель — это описание трёхмерных объектов на строго определённом языке или структуре данных. Она содержит геометрию, точку обзора, информацию о текстурах, освещении и методе расчёта цветов.

Основные техники рендеринга включают:

- растеризацию и построчный рендеринг, которые переводит модель из представления, в котором объекты состоят из примитивов в растровое изображение;
- рейкастинг, при котором сцена строится на основе пересечения лучей с визуализируемой поверхностью, используется для визуализации твердотельных объектов и трёхмерных скалярных полей;
- рейтрейсинг, алгоритм при котором отслеживается путь лучей и учитываются эффекты воздействия объектов на луч, позволяет достичь высокой степени реалистичности изображения и смоделировать большинство оптических эффектов;
- метод излучательности, являющийся методом решения уравнения рендеринга для сцен с диффузным отражением света объектами.

## **Построчный рендеринг**

Построчный рендеринг — это алгоритм определения видимых поверхностей в трёхмерной компьютерной графике который работает на основе рядов, а не полигонов или пикселей. Все многоугольники, которые должны быть отображены, сортируются вначале по у координате, с которой они впервые появляются. Затем каждый ряд или строка развёртки изображения вычисляется

используя пересечение строки развёртки с многоугольниками в начале упорядоченного списка, в то время как упорядоченный список обновляется для того, чтобы выкинуть из него невидимые более многоугольники, по мере того как активная строка развёртки продвигается к низу картинки.

Главным достоинством данного метода является то, что сортировка вершин вдоль нормали сканирующей плоскости уменьшает количество сравнений между рёбрами. Другим достоинством является то, что нет нужды перемещать координаты всех вершин из основной памяти в рабочую память — только вершины, определяющие рёбра, которые пересекаются с текущей строкой развёртки, должны быть в активной памяти, и каждая вершина читается только один раз. Основная память зачастую является очень медленной по сравнению с кэш-памятью процессора, поэтому отсутствие необходимости по несколько раз обращаться к вершинам в основной памяти может привести к существенному ускорению.

Самая ранняя публикация по методу построчного рендеринга была в 1967 году [24]. Другие ранние работы по этому методу были в 1969 году [25] и в 1972 году [26]. Большой вклад внесла также группа по графике Университета Юты под руководством Айвена Сазерленда и фирма Evans & Sutherland из Солт-Лейк-Сити. Ранние модели линейки генераторов изображений фирмы Evans & Sutherland использовали этот метод в аппаратном обеспечении для создания изображений на лету, построчно, без необходимости использовать буфер кадра, тем самым избавляя от необходимости использовать дорогостоящую память.

Главное достоинство построчного рендеринга по сравнению с Z-буферизацией заключается в том, что количество раз, которое обрабатываются видимые пиксели сводится к минимуму, в случае, если не используются эффекты прозрачности, оно будет равняться единице, что является преимуществом при высоких разрешениях и трудоёмких расчётах цвета. Однако данный метод плохо масштабируется при увеличении количества примитивов. Это происходит из-за размера промежуточных структур данных, используемых при рендеринге, который может превосходить размер Z-буфера для сложных сцен. Следствием этого является то, что в современных графических приложениях Z-буфер стал повсеместным.

## **Z-буферизация**

Z-буферизация — это управление координатами глубины изображения в трёхмерной графике, как правило осуществляемое аппаратно, но иногда и программно. Когда объект рисуется, глубина сгенерированного пикселя ( $z$

координата) записывается в буфер (Z-буфер или буфер глубины). Как правило, этот буфер организован в виде двумерного массива, где каждый элемент соответствует пикселю экрана. Если другой объект сцены должен быть нарисован в этом же пикселе, метод сравнивает два значения глубины и перезаписывает существующий пиксель если этот объект находится ближе к наблюдателю. Выбранное значение глубины затем записывается в буфер, перезаписывая старое. В итоге, Z-буфер позволит методу корректно воспроизвести обычное восприятие глубины — ближайший объект закрывает более дальний.

Изобретение концепции Z-буфера часто приписывают Эдвину Кэтмеллу, хотя Вольфганг Штрасер описал эту идею в своей докторской диссертации [27] в 1974 году за несколько месяцев до изобретения Кэтмелла.

### **Рейкастинг и рейтрейсинг**

Термин рейкастинг был впервые использован в компьютерной графике в 1982 году в статье Скотта Рота для описания метода рендеринга конструктивной твердотельной геометрии [21]. Однако самый первый алгоритм рейкастинга был применён в 1968 году Артуром Аппелем. Идея, на которой основан рейкастинг — это отслеживать лучи, выпущенные из камеры, по одному для каждого пикселя, и находить ближайший объект на пути этого луча. Этот объект тогда и будет являться тем, который виден сквозь этот пиксель. Используя свойства материала объекта, а также источников света в сцене можно рассчитать цвет объекта. При этом принимается упрощающее предположение о том, что если поверхность обращена к свету, то свет достигнет этой поверхности и не будет заблокирован или затенён. Цвет поверхности вычисляется с помощью традиционных моделей затенения трёхмерной компьютерной графики. Одним важным достоинством, которым обладал рейкастинг по сравнению с более старыми алгоритмами построения рендеринга, была его возможность легко обрабатывать неплоские поверхности и твердотельные объекты, такие как конусы и сферы. Если для математической поверхности можно рассчитать её пересечение с лучом, она может быть отображена с использованием рейкастинга. Замысловатые объекты могут быть созданы с помощью техник твердотельного моделирования и легко визуализированы при помощи рейкастинга.



*Рисунок 16: Изображение черепа, созданное с помощью объёмного рейкастинга*

Вообще, термин рейкастинг может относиться к различным проблемам и методам:

- общая проблема нахождения первого объекта, пересекающегося с лучом;
- техника удаления невидимых поверхностей, основанная на нахождении пересечений лучей, выпускаемых из камеры через все пиксели изображения;
- нерекурсивный алгоритм рейтрейсинга, который выпускает только первичные лучи;
- метод прямого объёмного рендеринга, который также называют объёмный рейкастинг, при котором луч проходит внутрь объекта и исследуемое трёхмерное скалярное поле сэмплируется на протяжении луча внутри объекта. Данный метод не порождает вторичных лучей [22].

Хотя в ранней литературе термины «рейкастинг» и «рейтрейсинг» были взаимозаменяемы [23], в последнее время их стараются различать. Различие заключается в том, что рейкастинг никогда не порождает вторичные лучи, в то время как алгоритмы рейтрейсинга могут делать это.

Рейтрейсинг — метод рендеринга изображений, при котором отслеживаются лучи света и моделируются эффекты при взаимодействии луча с виртуальными объектами. Данный метод способен производить результаты с очень высокой степенью реализма, обычно более высокой, чем методы построчного рендеринга, но имеет большую вычислительную стоимость. Поэтому рейтрейсинг часто применяется в приложениях, где возможно подготовить кадр заранее. Рейтрейсинг способен имитировать большое число различных оптических эффектов, таких как отражение, преломление, рассеяние и эффекты дисперсии света.

Рейтрейсинг работает путём отслеживания лучей от камеры сквозь каждый

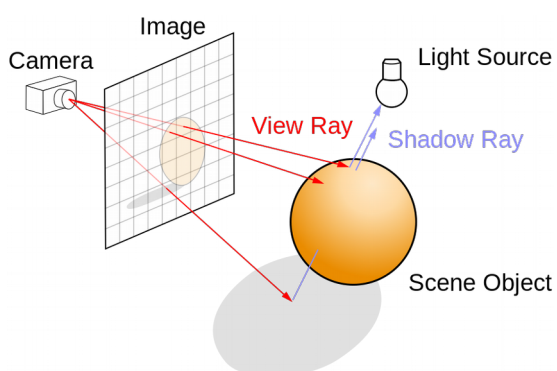
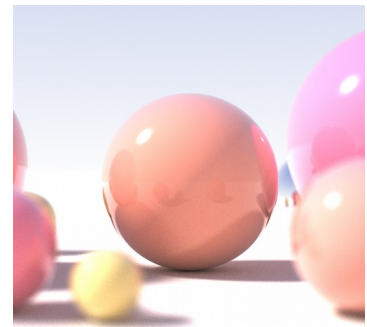


Рисунок 17: Алгоритм рейтрейсинга

пиксель виртуального экрана и вычисления цвета объекта, видимого сквозь этот пиксель. В отличие от рейкастинга, рейтрейсинг может порождать дополнительные лучи при столкновении луча с объектом. Таким образом, можно считать что рейкастинг является самым простым видом рейтрейсинга.



До 1979 года использовался только рейкастинг, важный прорыв в этой области случился благодаря работе Тёрнера Уиттеда [28]. Он предложил следующее: когда луч сталкивается с поверхностью, он может породить до трёх новых типов лучей: отражение, преломление и тень. Луч отражения выпускается в направлении зеркального отражения от поверхности. Ближайший объект, который он пересечёт будет тем, что будет видно в отражении. Луч преломления, проходящий сквозь прозрачный материал, работает схожим образом, за исключением того, что он может быть входящим или выходящим из материала. Луч тени выпускается по направлению к каждому источнику света. Если какой-либо непрозрачный объект находится на пути от поверхности к источнику света, значит поверхность находится в тени и этот источник не освещает её. Такой рекурсивный рейтрейсинг добавил больше реалистичности изображениям.

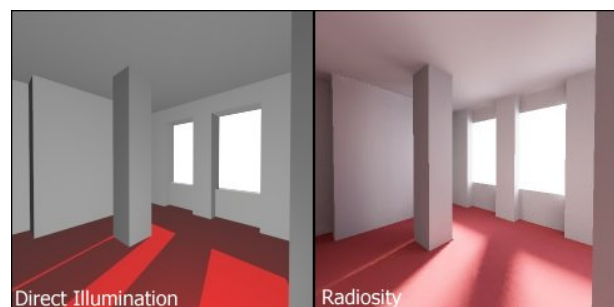


*Рисунок 18: Пример реалистичного изображения, полученного методом рейтрейсинга*

### **Метод излучательности**

Уравнение рендеринга — это интегральное уравнение, в котором количество светового излучения, исходящего из некоторой точки, определяется как сумма излучённого плюс отражённого светового излучения. Оно было одновременно введено в работах [29] и [30] в 1986 году. С тех пор многие методы реалистичного рендеринга пытаются решать это уравнение.

Одним из таких методов является метод излучательности, который решает уравнение рендеринга с помощью метода конечных элементов. Это алгоритм глобального освещения, значит, освещение, попадающее на поверхность исходит не только от источников света, но и от других поверхностей, отражающих свет.



*Рисунок 19: Сравнение прямого освещения (слева) и рассчитанного по методу излучательности (справа)*

Причём он не зависит от точки обзора, это увеличивает сложность вычислений, однако делает их полезными для последующего использования с другими точками обзора.

Методы излучательности были разработаны ещё в 1950-е годы для использования в инженерных целях (для расчётов теплопередачи). В 1984 году

они были усовершенствованы специально для проблем визуализации исследователями в Корнеллском университете [31] и университете Хиросимы [32].

## **Заключение**

В данной работе была рассмотрена история науки визуализации. Первые методы визуализации данных, такие как диаграммы и графики, были изобретены в XVIII веке, затем они усовершенствовались и их применение стало повсеместным. Также, рассмотрены яркие примеры визуализации информации на протяжении истории человечества, от «витрувианского человека» Леонардо да Винчи (XV век) до карты Лондонского метрополитена (XX век).

В конце XX века, благодаря появлению мощных компьютеров и удобных устройств визуального отображения, понятие визуализации значительно изменилось. До этого основным средством визуализации информации были рисунки на бумаге, что не позволяло визуализировать большие объёмы многомерных данных или динамически изменяющиеся данные. Компьютер предоставил эти возможности, наряду с интерактивностью при анализе данных. Развивалась научная визуализация, позволявшая представить результаты экспериментов и измерений различных процессов в более наглядной форме, помогающей учёному обрести понимание. В работе были рассмотрены ключевые изобретения в современной визуализации, причём как в визуализации статистических данных, так и в визуализации трёхмерных моделей.

## Список литературы

1. B.H. McCormick. *Visualization in Scientific Computing*. Computer Graphics 21, 6 (November 1987), ACM SIGGRAPH: New York.
2. K.W. Brodlie, L.A. Carpenter, R.A. Earnshaw, J.R. Gallop, R.J. Hubbard, A.M. Mumford, C.D. Osland, P. Quarendon. *Scientific Visualization: Techniques and Applications*. Springer-Verlag, 1992.
3. R.M. Friedhoff, T. Kiley, *The Eye of the Beholder*. Computer Graphics World, 13(8), 46, 1990.
4. H. Senay, E. Ignatius. *A Knowledge-Based System for Visualization Design*. IEEE Computer Graphics and Applications, November 1994.
5. R.B. Haber, D.A. McNabb, *Visualization Idioms: A Conceptual Model for Scientific Visualization Systems*. Visualization in Scientific Computing, IEEE Computer Society Press, 1990.
6. P.K. Robertson, *A Methodology for Choosing Data Representations*, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 11, No. 3, May 1991, pp. 56-68.
7. P. Robertson, L. De Ferrari. *Systematic Approaches to Visualization: Is a Reference Model Needed?* Scientific Visualization, Advances and Challenges, Academic Press, 1994.
8. B. Ferster. *Interactive Visualization: Insight through Inquiry*. The MIT Press, 2012.
9. M. Friendly. *Milestones in the history of thematic cartography, statistical graphics, and data visualization*. 2008.
10. S. Winchester. *The map that changed the world: William Smith and the birth of modern geology*. NY: Perennial, 2002.
11. S. Johnson. *The Ghost Map: The Story of London's Most Terrifying Epidemic – and How it Changed Science, Cities and the Modern World*. Riverhead Books, 2006.
12. I.B. Cohen. *Florence Nightingale*. Scientific American 250 (3): 128–137, March 1984.
13. E.R. Tufte. *The Visual Display of Quantitative Information*. Graphics Press, 2001.

14. R. Klein. *Scheduling of Resource-Constrained Projects*. Operations Research/Computer Science Interfaces Series, Springer US, 1999.
15. G. Sande. *Obituary: John Wilder Tukey*. Physics Today. 54 (7): 80–81, July 2001.
16. D.J. Albers, G.L. Alexanderson. *Benoit Mandelbrot: In his own words*. Mathematical People: Profiles and Interviews. Wellesley, MA: AK Peters. p. 214, 2008.
17. J.W. Tukey. *The future of data analysis*. Annals of Mathematical Statistics, 1962.
18. R.A. Becker, W.S. Cleveland. *Brushing scatterplots*. Technometrics, 29, 127–142, 1987.
19. M. Friendly. *A Brief History of Data Visualization*. Springer-Verlag.
20. T. Delmarcelle, L. Hesselink. *Visualizing second-order tensor fields with hyperstreamlines*. Computer Graphics and Applications, IEEE. 13 (4), 1993.
21. S.D. Roth. *Ray Casting for Modeling Solids*. Computer Graphics and Image Processing, 18 (2): 109–144, February 1982.
22. D. Weiskopf. *GPU-Based Interactive Visualization Techniques*. Springer Science & Business Media, p. 21, 2006.
23. J.D. Foley, A. van Dam, S.K. Feiner, J.F. Hughes. *Computer Graphics: Principles and Practice*. Addison-Wesley, 1995.
24. C. Wylie, G.W. Romney, D.C. Evans, A. Erdahl. *Halftone Perspective Drawings by Computer*. Proc. AFIPS FJCC, Vol. 31, 49, 1967.
25. W.J. Bouknight. *An Improved Procedure for Generation of Half-tone Computer Graphics Representation*. UI, Coordinated Science Laboratory, Sept 1969.
26. M.E. Newell, R.G. Newell, T.L. Sancha. *A New Approach to the Shaded Picture Problem*. Proc ACM National Conf., 1972.
27. W. Straßer. *Schnelle Kurven- und Flächendarstellung auf grafischen Sichtgeräten*. Berlin. 26.04.1974.
28. T. Whitted. *An improved illumination model for shaded display*. Proceedings of the 6th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 1979.



29. D.S. Immel, M.F. Cohen, D.P. Greenberg. *A radiosity method for non-diffuse environments*. Siggraph 1986: 133, 1986.
30. J.T. Kajiya, *The rendering equation*. Siggraph 1986: 143, 1986.
31. C. Goral, K.E. Torrance, D.P. Greenberg, B. Battaile. *Modeling the interaction of light between diffuse surfaces*. Computer Graphics, Vol. 18, No. 3.
32. T. Nishita, E. Nakamae. *Half-Tone Representation of 3-D Objects with Smooth Edges by Using a Multi-Scanning Method*. Journal of IPSJ, Vol. 25, No. 5, pp. 703-711, 1984 (in Japanese).