

**Профессор
Игорь Николаевич Бекман**

**ИНТЕРАКТИВНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ПРОФЕССОРА БЕКМАНА
(БУМ)**

**THE IGOR BECKMAN INTERDISCIPLINARY UNIVERSITY
(BIU)**

**Цели, задачи и идеи
Goals, Objectives and Ideas**



Добро пожаловать в Университет Бекмана.
Здесь каждый может учиться и/или
принять участие в создании свободных
интерактивных обучающих материалов
и открытых научных проектов.

**Москва
- 2019 –**

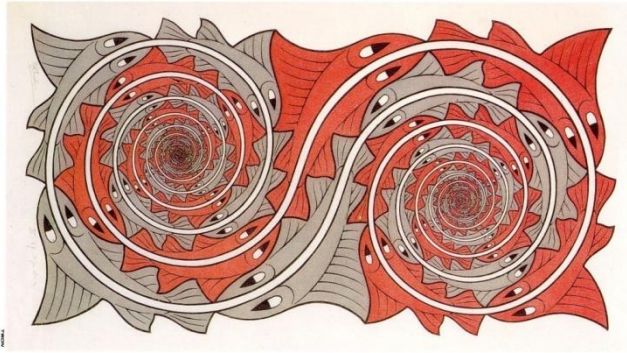
СОДЕРЖАНИЕ

**ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ УНИВЕРСИТЕТЕ
ИНФОРМАЦИЯ, ИНФОРМАТИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
РИСК
ЭЛЕМЕНТЫ ФРАКТАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ
СИНЕРГЕТИКА
КАТАСТРОФЫ
МОНАРХОАНАРХИЗМ**

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ БЕКМАНА

Оглавление

МАНИФЕСТ	3
КОНСТИТУЦИЯ БУМ	6
НАПРАВЛЕНИЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ.....	7
ИДЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТА	7
ДИСТАНЦИОННОЕ ОБУЧЕНИЕ И ОБРАЗОВАНИЕ	7
МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ – ОТ ОБУЧЕНИЯ К МЫШЛЕНИЮ И УПРАВЛЕНИЮ.....	9
ХОЛИЗМ, РЕДУКТИВИЗМ, СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И СИНЕРГИЗМ.....	12
КОМПЛЕМЕНТАРНОСТЬ НАУК	15
НООСФЕРА.....	18
ЕДИНСТВО И БОРЬБА ПРОТИВОПОЛОЖНОСТЕЙ	22
РИСК И СВОБОДА	24
ИНФОРМАЦИЯ, ИНФОРМАТИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.....	25
ПОРЯДОК И БЕСПОРЯДОК.....	27
ГЕОМЕТРИЯ ФРАКТАЛОВ.....	29



МАНИФЕСТ

*Всему своё время, и время всякой вещи под небом
время рождаться, и время умирать;
время насаждать, и время вырывать посаженное;
время убивать, и время врачевать; время разрушать, и время строить;
время плакать, и время смеяться; время сетовать, и время плясать;
время разбрасывать камни, и время собирать камни;
время обнимать, и время уклоняться от объятий;
время искать, и время терять; время сберегать, и время бросать;
время раздирать, и время сшивать; время молчать, и время говорить;
время любить, и время ненавидеть; время войне, и время миру.
Ветхий Завет. Книга Екклесиаст. Глава 3.*

Призрак бродит по Вселенной – призрак единенья. Призраки греческого единства мира восстали из гробов и бродят среди нас – раздробленных и разобщённых. Они призывают прекратить делить каждую встречную систему на отдельные части с изучением этой части отдельно от целого. Хватит разбрасывать камни, пора собирать их в кучки и строить единое здание, по возможности, объединяя общество, науку, экономику и религию.

В Торе и, естественно, в Библии изложено отношение Бога к единению людей. Сначала он в наказание за нравственное падение человечества истребил людей, наслав на них Всемирный Потоп. В живых оставил лишь благочестивого Ноя и его семью (жена, три сына: Сим, Хам и Иафет и жёны сыновей), которые перебрались на корабль (ковчег — корабль без мачт), построенный по проекту Всевышнего, и тем спаслись. Ной взял с собой по паре от каждого вида животных. Так возникло первое (и, возможно, единственное) экологическое единение людей и зверей. Оно было вынужденным: потоп кончился и все разбежались. Потомки Ноя постепенно стали заселять землю. Иафет стал родоначальником северных народов, от Хама произошли народы Африки, а от Сима – семиты, жившие в Азии. Так возникли разные народы, говорящие на разных языках. Однажды семиты решили подстраховаться от всяких неожиданностей типа потопа, для чего в Вавилоне начали строить высочайшую башню. Столп должен был достигать неба. В принципе, небо — прочное твёрдое тело, но оно периодически прорывается, в результате идут дожди, кончающиеся наводнениями и потопами. Поэтому нужно добраться до неба, заштопать его и подпереть. Кроме того, башня прославит имя строителей и будет служить ориентиром для путников. Стоили они не из природных камней, как раньше, а из нового материала — кирпича из обожженной глины, изобретение технологии производства которого произвело революцию в строительном деле. Говорили они на разных языках, но у них был и общий язык общения, что и позволило осуществить коллективное мероприятие. Идея эта Богу не понравилась. По нескольким причинам. Где гарантия, что люди, взбравшись на небо, не натворят что-то непотребное в его собственном жилище? К тому же строители особой нравственностью не отличались: на этой стройке, когда с лесов падал кирпич, строители горевали, потому что новый нужно было сделать и тащить наверх. А когда срывался человек, никто не переживал: новый сам поднимался на стройплощадку. Если бы людям удалось достроить башню, это стало бы доказательством их силы. Тогда ничто уже не остановило бы их на пути к осуществлению любых намерений. А ведь они были язычниками, что исключало стремление познать Творца. Тогда как бы они поняли, что только Он один управляет Вселенной? К тому же руководителем проекта был Нимрод (герой, воитель-охотник и царь, внук Хама, пытался сжечь Авраама (правнук Сима, родоначальник еврейского народа, первый пророк, предвестник единобожия) в печи) – личность темная, с далеко идущими помыслами: он хотел собрать под своей властью всё человечество. Однако, если этот царь Нимрод будет держать под контролем всё человечество, то не остается места для инакомыслящего. Куда диссиденту податься? Но самое главное – люди строили город и башню,

чтобы не быть рассеянными по всей земле. Вот это уже криминал, ибо Бог ясно сказал: *"Наполняйте землю"*, т.е. расселяйтесь всюду. А вы решили собраться здесь в кучку? Не пойдёт! Бог наслал бурю, смешал языки и рассеял род человеческий. Всё – для блага людей, естественно. Он, правда, оговорился, что в будущем наказание за вавилонское столпотворение будет аннулировано, но при определённых условиях: *"Ибо тогда изменю Я язык народов и сделаю его чистым. Чтобы все призывали Имя Всевышнего, и служили Ему"*. Так что, если верить Библии, то человечество, изначально бывшее одной семьёй, может ей однажды снова стать.

Смешение языков, рассеяние народов, привело к созданию множества языков, культур, религий, сект, партий, наук и т.п., что, в принципе, хорошо. Но раз начавшись, дробление уже не могло остановиться. Частного стало столько, что невозможно понять, где общее. Возникло



желание заняться обратной задачей: восстановить общее из частного. Тем более, что и Бог сам это понял и давно имеет занятие вновь и вновь связывать рассыпающуюся Вселенную. Галактики разбегаются, но мир, в целом, не подчиняется законам термодинамики — тепловая смерть ему не грозит. Природа призывает нас к объединению всего и вся.

Очевидно, что, создание разных народов, стран, культур, расселение народов по всей Земле, явилось благом, спасло от застоя и упадка. Но! Теперь нам расселяться больше некуда (заселять водные просторы, земные недра, атмосферу и ближайший Космос Бог не требовал). И, вообще, развитие в сторону "дробности" слишком далеко зашло, пора, как сказал Сент-Экзюпери, связать рассыпанные прутки "божественным узлом". Похоже, что наступило время поворота от центробежного к центростремительному. Попытки единения велись и ведутся. Это – глобализм в экономике, идея ноосферы (сфера разума – попытка объединения науки и религии), создание единой (глобальной) религии – религии личности и свободы, попытка формулировки в физике объединительной теории, описывающей все силы природы, разработка единого языка общения (*"ключ к всечеловеческому языку, потерянный в вавилонской башне, должен быть вновь искусственно выкован при помощи эсперанто"*, писал Жюль Верн). С эсперанто не вышло, попробуем без...

Пока существенных успехов ни в одном из этих направлений достигнуть не удалось. Проект культурного мира, как хора самостоятельных голосов не состоялся. Однако и нет экспериментальных доказательств, что это невозможно. Поэтому попытки продолжаются.

Уж больно дробление достало...

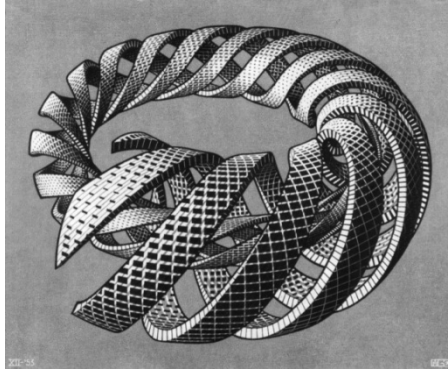
Одно из частных направлений – создание междисциплинарных наук, т.е. перекрытие пропасть, разделяющих современные классические науки или хотя бы исследование возможности создания таких перекрытий. Именно разработка междисциплинарного мышления – основное научное направление в междисциплинарном университете (БУМ). Предполагается организация на его площадке научно-исследовательских работ по единению различных научных направлений и технологий (миграция и диффузия, геометрия фракталов, ядерная медицина, ядерная сфера и др.).

Основное направление деятельности Университета – подготовка специалистов по предметам, которые либо вообще не преподаются в традиционных университетах, либо "размыты" по разным факультетам. БУМ осуществляет переподготовку специалистов классического типа (в первую очередь докторов наук и управленцев высшего звена), испытывающих необходимость в синтетическом образовании по таким направлениям, как анализ и управление риском, информатика и информационные технологии, компьютерные науки, управление детерминированным хаосом, миграция в природных, техногенных и общественных системах и т.п., т.е. готовит "универсалов", широкого профиля с глубокими знаниями в конкретных предметах и междисциплинарным типом мышления.

Университет выпускает не специалистов, а энциклопедистов. Но не просто людей с хорошей памятью – ходячих справочников, а универсальных специалистов, видящих и умеющих управлять причинно-следственными связями внутри системы, между системами, процессами и явлениями, кажущимися разнородными.

УЧЁНЫЕ ВСЕХ НАУК, СОЕДИНЯЙТЕСЬ!

...*"Всему – своё время"* – сказано точно. Но пришло ли время междисциплинарного образования? Не факт... Проверим экспериментально. Создадим Университет, начнём учёбу и посмотрим, как себя чувствует сейчас приведение Единение. Не выйдет – отправим обратно в могилу.



КОНСТИТУЦИЯ БУМ

БУМ – свободный университет, университет свободных преподавателей, свободных учеников, свободных идей и мыслей, т.е. открытая академическая площадка для получения новых знаний и свободного обмена мнениями.

Естественно, у него будет своя Конституция и свой Устав.

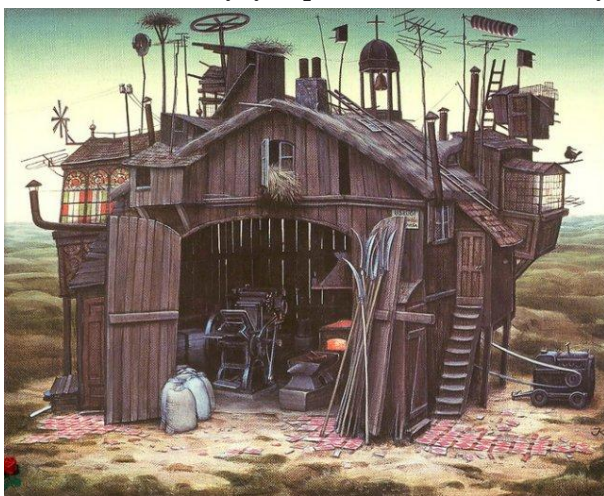
Впрочем, пока ничего нет, кроме благих намерений, естественно.

Понятно, что следует определить правовую базу Университета, права и обязанности руководства, попечительского совета, спонсоров, а также основы финансовой деятельности. В Университете должен работать учёный совет, учебно-методическое объединение, учебно-методический совет, система менеджмента качества образования и, естественно, факультеты и кафедры, с тематикой и направлением деятельности которых ещё придётся определиться. Устав будет включать основные задачи и предмет деятельности ВУЗа.

Предполагается, что в Университете занятия начнутся 1-го сентября 2015 г., так что время на подготовку документов ещё есть. Приглашаем всех желающих принять участие в разработке Устава и Конституции нового Университета.

При этом следует учитывать, что основным контингентом учащихся будут лица, активно работающие в науке: доктора наук, профессора, члены различных академий, т.е. лица, уже имеющие все возможные дипломы, учёные звания и учёные степени, и, скорее всего, высокие должности. Это – те, кто хочет обладать знаниями выпускников аспирантуры нескольких различных факультетов. Например, специалисты по применению радионуклидов и ионизирующих излучений, могут прослушать соответствующие курсы лекций, читаемые на физическом, химическом, биологическом и медицинском факультете МГУ, а также в ВУЗах, готовящих инженеров по проектированию медицинского оборудования. Но не отдельных, а связанных единой целью выпуска специалиста универсальной модели.

Предусматривается также подготовка менеджеров высшего звена, в области науки (директора институтов), руководителей учебных заведений (деканы факультетов, ректора ВУЗов, в отдельных случаях – заведующие кафедр) и администраторов (губернаторы, мэры, префекты, министры, руководители профильных комитетов в Государственной думе и т.п.). Занятия с этим контингентом будут проводиться по индивидуальным планам.



В меньшей степени, но всё же значительное внимание будет уделено подготовке докторов наук, для чего будет организована докторантура. Этот контингент будет слушать общие лекции, и участвовать в общих семинарах.

Предполагается, что на сайте Университета будет находиться в бесплатном доступе вся необходимая литература, курсы лекций (как письменные, так и устные), программы семинарских занятий. Этими материалами могут свободно пользоваться все посетители, склонные к развитию междисциплинарного мышления. Однако, какой-либо специальной подготовки бакалавров, магистров или аспирантов здесь не предусмотрено. Переподготовка специалистов и менеджеров высшего звена видимо будет платной.

Для этого контингента предусматривается рассылка различных методических материалов, задач и упражнений, проверка решений, принятие зачётов и экзаменов, а также выполнение курсовых работ и различных творческих заданий.

В Университете предполагается активная научная деятельность (включая получение различных грантов и выполнение заказов) как по развитию междисциплинарных дисциплин и созданию языков междисциплинарного общения, так и по разработке методических пособий по облегчению учащихся целостному восприятию мира науки. Предполагается, что основными научными направлениями будут: анализ и управление риском, управление системами детерминированного хаоса, информатика, компьютерные науки, геометрия фракталов в различных приложениях и в искусстве, а в прикладном плане – ядерная сфера, ядерная медицина, ответственная жизнь в окружающей среде, диффузия, миграция и массоперенос в природных и техногенных сферах и др.

Как это получится, и получится ли вообще, покажет время. И активность участников проекта...

Науки! Объединяйтесь!

НАПРАВЛЕНИЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ:

1. **ЯДЕРНАЯ СФЕРА** – радионуклиды всегда и везде; оружие, энергетика и медицина.
2. **ИНФОРМАТИКА** – в компьютере, в телеграфе, в физической химии и на кухне; информация, как властелин мира.
3. **СРЕДА ОБИТАНИЯ** – с нами и без нас; ответственная жизнь в окружающей среде
4. **ГЕОМЕТРИЯ ФРАКТАЛОВ** в науке, технике, искусстве, политике и управлении.
5. **АВТОВОЛНОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ** – теория катастроф и революций, самоорганизующиеся системы в природе, технике и обществе; как прожить без бифуркаций?
6. **РИСК** – анализ и управление нашей и вашей свободой; Брат! Есть у тебя парадигма?
7. **ДИФФУЗИЯ, МИГРАЦИЯ и МАССОПЕРЕНОС** – перемещение всего и вся с места на место.
8. **РАДИАЦИОННАЯ И ЯДЕРНАЯ МЕДИЦИНА** – единение физиков, химиков, врачей, пациентов и гробовщиков.
9. **ЭКОЛОГИЯ** – идея дома в математике, естественных и гуманитарных науках, а также в практической деятельности; радиация в нас и вокруг нас.
10. **ПОРЯДОК, ХАОС И ЗАКОНОМЕРНЫЕ СЛУЧАЙНОСТИ**

Учебные материалы включают конспекты лекций, лекции (видео и ауди), учебные пособия и книги участников проекта, задачки и решебники, отчёты и фильмы о наших экспедициях и путешествиях, научно-популярные тексты, мемуары и рассказы, дополнительная учебная литература, ответы на вопросы, задаваемые учащимися.

ИДЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТА



ДИСТАНЦИОННОЕ ОБУЧЕНИЕ И ОБРАЗОВАНИЕ

*Обучать народ – значит делать его лучше;
просвещать народ – значит повышать его нравственность;
делать его грамотным – значит цивилизовать его.*

Виктор Гюго

Начнём с некоторых определений.

Дистанционное образование – образование, которое осуществляется с помощью компьютеров и телекоммуникационных технологий и средств. Субъект дистанционного образования удалён от педагога и/или учебных средств, и/или образовательных ресурсов. Дистанционное образование осуществляется с преобладанием в учебном процессе дистанционных образовательных технологий, форм, методов и средств обучения, а также с использованием информации и образовательных массивов сети Интернет. Помимо Интернета, популярной технологией является пересылка учащимся образовательных контентов (электронных и бумажных учебников, лекционных видеокурсов, видеосеминаров и др.) по электронной почте. Данная технология интерактивна: в режиме реального времени учащиеся проходят тестирование знаний, консультируются с педагогами и т.д.

Дистанционное обучение – взаимодействие учителя и учащихся между собой на расстоянии, отражающее все присущие учебному процессу компоненты (цели, содержание, методы, организационные формы, средства обучения) и реализуемое специфичными средствами Интернет-технологий. Дистанционное обучение строится на использовании среды передачи информации (почта, телевидение, радио, информационные коммуникационные сети).

Виртуальная школа – образовательное учреждение, в котором педагогический процесс и обучение студентов/школьников осуществляются через Интернет. Материалы по учебным курсам в виртуальной школе представлены в электронном виде и выкладываются на веб-сайте таким образом, чтобы прошедшие авторизацию студенты могли ими пользоваться. Эти материалы включают в себя тексты лекций по предмету, интерактивные тесты и тренажеры, словари и т.д.

Чат-занятия – учебные занятия, осуществляемые с использованием чат-технологий. Чат-занятия проводятся синхронно, т. е. все участники имеют одновременный доступ к чату. В рамках многих дистанционных учебных заведений действует чат-школа, в которой с помощью чат-кабинетов организуется деятельность дистанционных педагогов и учеников.

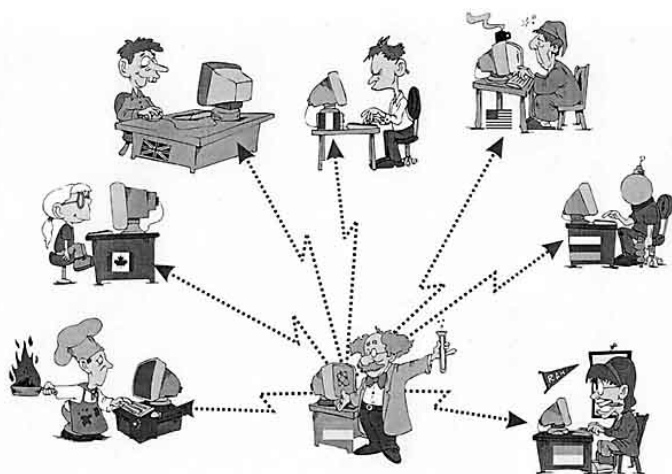
Веб-занятия – дистанционные уроки, конференции, семинары, деловые игры, лабораторные работы, практикумы и другие формы учебных занятий, проводимых с помощью средств телекоммуникаций. Для веб-занятий используются специализированные образовательные веб-форумы – форма работы пользователей по определённой теме или проблеме с помощью записей, оставляемых на одном из сайтов с установленной на нём соответствующей программой. От чат-занятий веб-форумы отличаются возможностью более длительной (многодневной) работы.

Дистанционное обучение появилось в Европе в конце 18-го века после создания регулярной и доступной почтовой связи. В рамках "корреспондентского обучения" учащиеся по почте получали учебные материалы, переписывались с педагогами и сдавали экзамены доверенному лицу или в виде научной работы. Появление радио и телевидения позволило перейти к дистанционному образованию – целенаправленной подготовке специалистов высокой квалификации. В 1969 г. был открыт первый в мире университет дистанционного образования – Открытый Университет Великобритании. Мощное развитие дистанционных методик началось после создания компьютеров и сети Интернет. Возникли многочисленные виртуальные школы и университеты. Примером является Викиуниверситет (*Wikiversity*) – проект фонда "Викимедиа". В последнее время количество студентов, обучающихся дистанционно, растёт быстрее, чем число студентов дневных отделений. В США на данный момент дистанционно обучается ~400 тысяч студентов. Развиваются университеты и в России. Созданы такие порталы, как Федеральный образовательный портал РФ, Федеральный портал "Российское образование", портал "Информационно-коммуникационные технологии в образовании" и др. В Московском государственном университете функционирует Интернет-портал Школы дистанционного образования в МГУ www.distance.msu.ru Дистанционное обучение проводится на сайтах многих факультетов МГУ.

Главный недостаток существующих образовательных виртуальных систем, что они дублируют идеологию классического образования: готовят химиков, математиков, журналистов и т.п., т.е. готовят специалистов. Между тем возникли целые направления, требующие подготовки энциклопедистов, т.е. лиц, свободно владеющих несколькими науками. Примером является ядерная медицина, нуждающаяся в работнике, имеющем дипломы об окончании Физического факультета МГУ, Московского инженерно-физического института, Химического факультета МГУ и Медицинской академии. На практике

осуществить это трудно. Времени не хватает на последовательное окончание четырёх факультетов университета и инженерного ВУЗа в придачу.

Между тем, очевидно, что студент, обучающийся 6 лет (12 семестров) получает специальные знания максимум 2 года (4 семестра). Остальное время он тратит на физкультуру-спорт, военное дело, иностранные языки, ухаживание за противоположным полом, хождение в театр-кино и т.п., в основном – просто на взросление. Уже на этом можно резко сократить время подготовки энциклопедиста. Но основная экономия – концентрирование знаний, размазанных по



различным курсам и факультетам.

Ограничимся двумя примерами.

1. Распределение Ферми-Дирака обычно вводится в квантовой механике и совместно с принципом Паули используется для описания заполнения электронами электронных оболочек атомов или нуклонами – энергетических уровней ядра. Студенты знакомятся с этим распределением в курсе ядерной физики (если слушают этот курс, естественно). При этом студентам-химикам невдомек, что адсорбция по Ленгмюру и кинетика химической реакции 2-го порядка – это тоже распределение Ферми-Дирака, а студенты-физики не понимают, что распределение атомов водорода в дефектах металла, т.е. в ловушках с ограниченной емкостью описывается тем же распределением. А все вместе они не знают, что распределение Ферми-Дирака – частный случай стандартного статистического распределения и входит в семейство Пирсона. В результате студент, где бы он ни учился, так и не понимает в полном объеме особенности этого распределения, какие возможности оно предоставляет, каковы его свойства и где его можно весьма эффективно применить на практике.

2. Геометрии фракталов, как характеристике дробного пространства, обучают на математических факультетах, немного на физических, и, изредка, на химических. Возможно, в академиях живописи и дизайна. А как с этим обстоят дела при подготовке специалиста по экологической химии? Ответ: никак! Студент долго изучает свойства адсорбента и влияние развитости рельефа его поверхности на термодинамику и кинетику адсорбции (сведения необходимы для создания методов мониторинга токсичных веществ в среде обитания и для разработки методов удаления этих веществ из природных объектов), обмен радионуклидами между аэрозолями и коллоидными частицами, в том числе – за счёт эффектов отдачи, он знакомится с особенностями миграции токсичных веществ в природных и техногенных средах и множеством других интересных вещей, но он не понимает, что в основе всего этого лежит геометрия фракталов. Между тем, если бы он свободно владел этим разделом математики, он бы количественно характеризовал изучаемые процессы. В этом случае он стал бы специалистом на порядок быстрее, причём – специалистом существенно более высокого уровня.

Таких примеров много: диффузия и миграция, информатика, риск, математическая лингвистика... и т.д. и т.п. Мы их рассмотрим в дальнейшем.

При разработке методологии универсального преподавания сразу вспоминаются "Два капитана" В. Каверина: **Помнится, мы проходили утку. Это были сразу три урока: география, естествознание и русский. На уроке естествознания утка изучалась как утка какие у неё крылышки, какие лапки, как она плавает и так далее. На уроке географии та же утка изучалась как житель земного шара: нужно было на карте показать, где она живет и где ее нет. На русском Серафима Петровна учила нас писать "у-т-к-а" и читала что-нибудь об утках из Брема. Мимоходом она сообщала нам, что по-немецки утка так-то, а по-французски так-то. Кажется, это называлось тогда "комплексным методом". Может нам вернуться к этой самой педагогике?**

Педагогика – направление в науке, ставившее своей целью объединить подходы различных наук (медицины, биологии, психологии, педагогики) к развитию ребёнка.

Нам представляется, что развитие дистанционного образования должно предусматривать стирание граней между различными предметами, внедрение в сознание учащихся междисциплинарного мышления, обучение их способности видеть связи между разнородными системами и методам их эффективного управления. При этом следует ориентироваться на лиц с законченным высшим образованием (желательно, уже имеющих все возможные в России учёные степени и звания), успешно работающих в науке, технике или менеджменте.

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ – ОТ ОБУЧЕНИЯ К МЫШЛЕНИЮ И УПРАВЛЕНИЮ



*Думать – значит принимать всю сложность,
однако полемисты не думают,
поскольку сводят все сложности к двум противоположностям.*

Э.Э.Шмитт. Коцерт "Памяти ангела"

Науку часто смешивают со знанием.

Это грубое недоразумение.

*Наука есть не только знание, но и сознание,
т. е. умение пользоваться знанием как следует.*

В. Ключевский

Философ Р. Декарт в начале 17-го века ввёл понятие «древо наук», стволом которого является философия, а ветвями и веточками – различные науки. Подобный символ предвосхитил развитие и науки

и образования. Началось движение по этим веточкам, натурфилософия распалась на математику, физику, химию, филологию, теологию, медицину и т.п. Возникли соответствующие факультеты и институты, со своими предметами преподавания и со своим языком. Единые ранее структуры стали дробиться, чуть ли не до молекулярного состояния. Учёные даже близких специальностей перестали понимать друг друга. Фразу *"Применение в ОФЭТ хелатных комплексов технеция-99т позволило построить информативную синограмму и провести эффективную диагностику неходжгинской лимфомы"* не поймёт никто. В целом она вполне осмысленна, но химик знает лишь, что такое хелатный комплекс, физик и математик, как строится и интерпретируется синограмма, а врач – какие бывают неходжгинские лимфомы. И никто не знает, что такое ОФЭТ.

Здесь, как в ситуации обследования слона слепыми: один ощупал хобот, другой – клыки, третий – хвост. У каждого сложилось своё понимание того, что такое слон. Но от этого слон слоном не стал.

Между тем, речь идёт о жизни и смерти пациента. И хорошо бы спецам договориться, как использовать диагностику для лечения больного...

В конце 20- века стало очевидно, что наука – вовсе не дерево, а набор островов конкретного знания, разделённых морем незнания (пустоты). В некоторых местах эти островки образуют континенты, архипелаги, и даже соприкасаются и перекрываются, и тогда возникают такие науки, как физическая химия, химическая физика, экологическая радиохимия, или такой шедевр, как физико-химическая медицина. Но возникнув, они тут же начали дробиться: физическая химия немедленно распалась на термодинамику, кинетику и квантовую химию, термодинамика – на равновесную и неравновесную и т.п., каждый раздел обзавёлся своим языком и своими символами, так утерялась связь между различными разделами, в также и с химией и с физикой, как таковыми. До сих пор не ясно, что находится между этими островами, можно ли перекрыть знаниями разрывы между ними, присоединив к континенту известного, или это невозможно.

Раздробленность явно тормозит развитие наук, что, в конце концов, скажется на технике и технологии, да и на развитии всего общества в целом.

Стало очевидно, что пора потратить некоторые усилия на создание междисциплинарных наук, междисциплинарного образования, на развитие междисциплинарных языков, междисциплинарного мышления, с целью создания на его основе нового типа управления сложными системами.

Проблема современного образования заключается в том, что в его основе до сих пор лежат дисциплины, появившиеся в середине 19-го века, т.е. ещё до наступления индустриальной эпохи. Наука в течение последних двух веков развивалась преимущественно по пути специализации, результатом чего явился реестр дисциплин и специализаций, закреплённый в современной системе образования. Но возникло противоречие: традиция жёсткого разграничения дисциплин стала противостоять междисциплинарности, свойственной многим направлениям науки, появившимся в конце 20-го века. Это было вполне терпимо, пока требовались конкретные специалисты. Однако в наше время стали востребованы профессионалы, способные работать одновременно в разных областях знания.

"Специалист подобен флюсу – полнота его односторонняя" – справедливо заметил Козьма Прутков полтора века тому назад. В пределе он знает все ни о чём. Правда универсал в пределе не знает ничего обо всём, что тоже плохо. "Никто не обнимет необъятного" – утверждал тот же К.Прутков. Так что в подготовке современного специалиста меру надо знать.

Необходимости расширения научного мировоззрения способствовала научно-техническая революция 60-х–70-х годов XX века, требующая от науки более глубокого и интенсивного проникновения в суть законов природы и общества, чем это удавалось сделать при помощи дисциплинарного и междисциплинарного подходов. Возник трансдисциплинарный подход и началась глобализация науки.

Коротко остановимся на классификации подходов к образованию.

Дисциплинарный подход в настоящее время является основным. Этот подход делает выпускника специалистом в конкретной области. Например, химик должен разбираться в составе веществ, осуществлять их анализ и синтез. Этот подход дробит науку на отдельные предметные области, каждую из которых исследует отдельно от остальных. Если решение проблемы выходит за рамки возможностей дисциплинарных подходов, то принято считать, что оно находится «на стыке научных дисциплин». Однако, этот стык часто не удаётся преодолеть, хотя бы потому, что каждая дисциплина использует свой язык. *Трудно представить, что на границе Китая и России живут народы, разговаривающие на языке, одновременно понятном и русским и китайцам.* Всё же часто именно на стыке дисциплин рождаются новые знания и возникают междисциплинарные науки, каким-то образом нашедшие общий язык. *В нашем примере это – суржик, т.е. любое языковое образование с грамматикой одного языка и лексикой другого (фраза «шпрехаю на дойче» – немецко-русский суржик).*

Междисциплинарные исследования – способ организации исследовательской деятельности, предусматривающий взаимодействие в изучении одного и того же объекта

представителей различных дисциплин. Междисциплинарный подход допускает прямой перенос методов исследования из одной научной дисциплины в другую. Он возможен при наличии сходств исследуемых предметных областей. Например, химическая экология изучает химические процессы, осуществляемые в экосистемах, а экологическая химия – последствия воздействия на биологическую систему химических веществ и возможные пути уменьшения их отрицательного влияния. *(В терминах химическая экология и экологическая химия "ведущая" дисциплина определяется последним словом, а "ведомая" – первым).* Междисциплинарное исследование предполагает одновременное решение трёх видов проблем: методологической, организационной и информационной.

Мультидисциплинарный подход основан на рассмотрении обобщённой картины предмета исследования, по отношению к которой отдельные дисциплинарные картины предстают в качестве частей. При этом переноса методов исследования из одной дисциплины в другую не происходит. Например, человек рассматривается, как сложный объект исследования, отличающийся от других объектов рядом особенностей (анатомическими, химическими, психологическими, психическими, физиологическими и т. д.). Для изучения этих особенностей применяются только, соответствующие им, дисциплинарные подходы и методы. Однако, сопоставляя результаты дисциплинарных исследований в рамках мультидисциплинарного подхода, удаётся найти новые, ранее не обнаруживаемые, сходства исследуемых предметных областей. Накопление результатов междисциплинарных исследований в сходных областях дисциплинарных знаний приводит к появлению новых мультидисциплинарных дисциплин, например, таких, как физико-химическая медицина. Этот подход нашёл практическое применение в работе экспертных групп. Он перспективен, когда для решения дисциплинарной проблемы требуется учесть множество известных факторов, являющихся предметом исследования других дисциплин. При этом иногда удаётся достигнуть достаточной полноты знаний.

Трансдисциплинарность – способ расширения научного мировоззрения, заключающийся в рассмотрении того или иного явления вне рамок какой-либо одной научной дисциплины. Этот подход не ограничивается междисциплинарными отношениями, а размещает эти отношения внутри глобальной системы, без строгих границ между дисциплинами. Трансдисциплинарность обеспечивает высокий уровень образованности, разносторонности, универсальности знаний конкретного человека. Она реализуется, если проблема исследуется сразу в нескольких уровнях. Например, на физическом и ментальном уровнях, глобально и локально. Трансдисциплинарность используют как принцип организации научного знания, открывающий широкие возможности взаимодействия многих дисциплин при решении комплексных проблем природы и общества. Трансдисциплинарность считают одним из основных способов решения проблем XXI века. Об это свидетельствует текст «Всемирной Декларации о Высшем образовании для XXI века: подходы и практические меры», принятой участниками Международной конференции по Высшему образованию, состоявшейся в 1998 г. в Париже. Декларация содержит рекомендации поощрять трансдисциплинарность программ учебного процесса и учить будущих специалистов, используя трансдисциплинарный подход для решения сложных проблем природы и общества.



Междисциплинарное образование не отказывается от дисциплинарного овладения знаниями, оно дополняет и насыщает его приёмами междисциплинарной подачи материала, которые и формируют междисциплинарное мышление (офсетное зрение).

Начать можно с чтения многокомпонентного курса, включающего несколько дисциплин, как нечто единое, как конкретный предмет. Примером является курс Ядерная индустрия, в котором естественным образом переплетаются идеи и методы, ядерной физики, квантовой механики, химии и радиохимии, биологии и медицины, дозиметрии и техники безопасности, риска,

экологии, экономики, законодательства, а также инженерной мысли. Подобными курсами могут быть Ядерная медицина, Риск: анализ и управление, Диффузия, миграция и массо-перенос в природных и техногенных средах, Информатика в физической химии, системах связи, в компьютере, интернете и СМИ, Геометрия фракталов в химии, физике, медицине, технике, географии, метеорологии, в живописи и дизайне, в экономике и Библии, Экология и ответственная жизнь в окружающей среде и т.п. Более сложными являются лекции, в которых предпринимаются попытки перекрытия разрывов между далеко отстоящими темами. Примерами являются "Ноосфера – синтез науки и религии", "Катастрофы, революции, самоорганизующиеся системы, автоволновые процессы в науке, технике, медицине и обществе", "Порядок, хаос, детерминированный хаос и закономерные случайности", "Пустота в физике, химии, религии, человеке и культуре".

Для закрепления материала следует предусмотреть семинары с задачами, упражнениями и компьютерным практикумом, а также курсовые работы и творческие проекты.

ХОЛИЗМ, РЕДУКТИВИЗМ, СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И СИНЕРГИЗМ

*Целое это больше, чем сумма его частей
Аристотель «Метафизика»*

*Любая наука системна. Системность – это научный способ упрощать.
У. Эшби "Введение в кибернетику".*

Древние натурфилософы рассматривали мир, как единое целое. Это было правильно, но не практично. Науки стали возникать и развиваться только после вооружения естествоиспытателей аналитическим подходом. Нельзя объять необъятное, но можно расчленить это необъятное и изучить каждую часть в отдельности, т.е. провести анализ. Применение анализа называется редукцией, под которой понимают упрощение, сведение сложного к более простому, обозримому, более доступному для анализа и управления. Редуктивизм привёл к успеху, возникли науки: математика, физика, химия, биология.... Были решены конкретные проблемы, например, создана модель атома. Появился соблазн объяснения сложных явлений, основываясь на законах, полученных при изучении простых систем. Давайте сведём биологические явления к химическим и физическим законам, или социологически – к биологическим.

Здесь дело не пошло. Прогресс застопорился.

Учёные с удивлением обнаружили, что и природа и общество сложны, а механистическая картина мира, которой они так долго и с таким успехом придерживались, отражает лишь жёсткие причинно-следственные связи и линейный характер зависимостей. Между тем, в нас и вокруг нас царит детерминированный, динамический по своей природе, хаос, управляемый к тому же нелинейными законами. Мало изучить влияние внешних сил на сложные системы, отработать способы управления ими, но и следует сформулировать законы организации внутренней структуры этих систем, законы их самоорганизации, саморазвития и самоуправления.

Требования века заставляют перейти от анализа и редуктивизма к холизму, т.е. к философии цельности. Конечно, следует развивать междисциплинарные направления в науке, междисциплинарное образование и междисциплинарное мышление. Но этого мало! Объединение разных наук приводит к эффектам синергизма, т.е. к ситуациям, когда целое больше, чем простая сумма его частей. Следовательно, развитие наук следует вести в рамках синергетики, с учётом идей фрактальной геометрии (самоподобия), автоволновых процессов, случайностей и детерминированного хаоса.

К мудрецу привели слона и спросили: – Что это такое? – Я не знаю, что это такое, – отвечал мудрец. – Но такое таким и должно быть!

Начнём с некоторых определений.

Редукционизм (от *reductio* – возвращение, приведение обратно) – методологический принцип, согласно которому сложные явления могут быть полностью объяснены с помощью законов, свойственных явлениям более простым (например, социологические явления объясняются биологическими или экономическими законами). Редукционизм абсолютизирует принцип редукции (сведения сложного к простому и высшего к низшему), игнорируя появление эмерджентных свойств в системах более высоких уровней организации. Хотя как таковая, обоснованная редукция может быть плодотворной (пример – планетарная модель атома).

Эмерджентность (от *emergent* – возникающий, неожиданно появляющийся) в теории систем – наличие у какой-либо системы особых свойств, не присущих её подсистемам и блокам, а также сумме элементов, не связанных особыми системообразующими связями; несводимость свойств системы к сумме свойств её компонентов; синоним – «системный эффект». В биологии и экологии понятие эмерджентности можно выразить так: одно дерево – не лес, скопление отдельных клеток – не организм. Например, свойства биологического вида или биологической популяции не представляют собой свойства отдельных особей, понятия рождаемость, смертность неприменимы к отдельной особи, но применимы к популяции или виду в целом. В эволюционистике выражается как возникновение новых функциональных единиц системы, которые не сводятся к простым перестановкам уже имевшихся элементов. В почвоведении: эмерджентным свойством почвы является плодородие.

Анализ – процедура мысленного расчленения предмета на части в целях его дальнейшего изучения

Системный анализ – метод познания, представляющий собой последовательность действий по установлению структурных связей между переменными или элементами исследуемой системы. Это методология решения сложной проблемы путём последовательной декомпозиции её на взаимосвязанные частные подпроблемы. Любой объект бесконечно сложен, поэтому задача упрощается выделением только тех элементов и связей, которые обеспечивают достижение цели. Системное исследование представляет собой процедуру описания объекта, способа его функционирования и тенденций развития. Основная процедура – построение обобщенной модели, отображающей взаимосвязи реальной ситуации. Системный

анализ применяется для решения задач, для которых отсутствуют стандартные решения, и которые, в принципе, не могут быть формализованы без использования методов системного анализа. Идеи системного анализа используются для управления. Полезность системного анализа обусловлена глубоким проникновением в суть проблемы, выявлением взаимосвязей, способствующих обнаружению нестандартных решений, в большей четкости формулирования целей, в большей эффективности распределения ресурсов. Ограниченность системного анализа обусловлена неизбежной неполнотой анализа (принцип непознаваемости), приближённой оценкой эффективности, отсутствием способов точного прогнозирования перспективы.

Холизм (от *ὅλος* *Holos*, целое, все, всего) – учение о целостности нашего мира, о том, что все его элементы, живая и неживая природа – связаны как части единой большой системы – Бога, Мира, Вселенной. Исходная трактовка холизма более функциональна и близка к синергетике – все свойства некоей системы, будь то (физическая, биологическая, химическая, социальная, экономическая, психическая, языковая или любая другая система.) не могут быть определены или объяснены по свойствам отдельных составных частей. Вместо этого, наоборот, система как целое, определяет способ поведения своих частей.

Синергизм – совместное действие для достижения общей цели, основанное на принципе, что целое представляет нечто большее, чем сумма его частей. Синергизм означает превышение совокупным результатом суммы слагающих его факторов. Так, доходы от совместного использования ресурсов превышают сумму доходов от использования тех же ресурсов по отдельности. Данное понятие также называется синергетическим эффектом (эффектом $2+2=5$).

Синергетика (от *συν* – приставка со значением совместности и *ἐργον* «деятельность»), или **теория сложных систем** – междисциплинарное направление науки, изучающее общие закономерности явлений и процессов в сложных неравновесных системах (физических, химических, биологических, экологических, социальных и других) на основе присущих им принципов самоорганизации. Синергетика является междисциплинарным подходом, поскольку принципы, управляющие процессами самоорганизации, представляются одними и теми же безотносительно природы систем, и для их описания должен быть пригоден общий математический аппарат.



Можно утверждать, что холизм – философия синергетики и системного анализа. Коротко остановимся на истории появления этого направления в философии.

Идеи холизма появились давно ещё Аристотель в своей "Метафизике" утверждал, что целое больше, чем сумма его частей. Г.Гегель был последовательным холистом. К холистам можно отнести Г.В.Лейбница с его философской системой монадология. Но сам термин предложен Яном Смэтсом.

Рис. 1. Ян Смэтс – основатель философии холизма.

В первой половине 20-го века на юге Африке процветал один политик (бравый вояка, к тому же), который бы сильно удивился, если кто-то назвал бы его философом (как сейчас делают все энциклопедии). Звали его Ян Смэтс (*Jan Christiaan Smuts*, 1870 – 1950). Довольно долго он был премьер-министром Южно-Африканского союза (того, что после 1961 г. называют ЮАР). Командовал отрядами во время Англо-бурской войны (1899-1902) в Трансваале, был её активным участником, возглавлял крупное партизанское соединение буров. Во время Первой мировой войны он руководил армией Южной Африки против Германии, захватив Германскую Юго-Западную Африку. Успел побывать командующим британской армии в Восточной Африке. Во время второй мировой войны – британский фельдмаршал. Деятельность его, впрочем, распространялась не только на юг Африки, но и на весь мир – он, например, соавтор устава Лиги Наций (выдвинул идею мандатной системы). Расист, проводил активную политику апартеида. Тот ещё философ!

– Ну и что? – спросите вы, – какое нам дело до африканских фашистов?! Своих что ли мало? Мы ведь вроде о философских аспектах размышляем ...

– А то, что он изобрел холизм!

– Ну и что? К чему нам идеи доморощенного философа?

– Очень даже к чему! Возможно, скоро вся наука и все образование встанет на рельсы холизма. И покатится шибко...

Объясняю!

В чём особенность нынешней цивилизации? В том, что её сотрясают многочисленные кризисы. В чём их фундаментальная причина? Как в чём?! – отвечают философы, – конечно в редуктивизме, в аналитическом подходе к действительности.

Вот те на! Мы Анализу только что не молимся, а он-то во всем виноват. Редукция – упрощение, сведение сложного к более простому, более доступному для анализа или решения. Сложные явления могут быть объяснены на основе законов, свойственных более простым системам. Сводя сложное к более простому, анализ игнорирует специфику более высоких уровней организации.

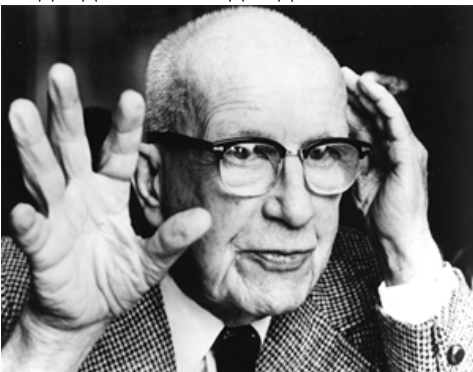
Древние натурфилософы анализ игнорировали – они рассматривали мир, как единое целое. Наивные люди! С таким мировоззрением науку не создашь. Поэтому 300 лет тому назад, ученые вооружились аналитическим подходом. Дело пошло! Новый подход показал свою эффективность при решении чуть ли не любых задач теории и практики. Так что повседневная жизнь каждого человека изменилась (говорят, в лучшую сторону). Но чем глубже внедряли аналитику, тем больше усиливались технические науки и хирели гуманитарные. А это уже не хорошо – равновесие между физиками и лириками нарушилось. В точные науки потекли финансовые и технические ресурсы, молодежь и т.п., т.е. включилась положительная обратная связь. Думать о смысле жизни стало некому. Технический прогресс рванул куда-то не туда. Вот и влетели в тупик. Начались кризисы: политические, экономические, экологические и т.п.

Тут-то и вспомнили о холизме. Холизм – философия цельности – учение, рассматривающее мир как результат творческой эволюции, которая направляется нематериальным «фактором цельности». Основоположник – Ян Смэтс, студентом написавший книгу "Эволюция личности", которую, правда, не опубликовал. Но в 1926 у него вышла книга "Холизм и эволюция". Когда Альберт Эйнштейн прочитал эту книгу, он сделал следующий прогноз: в грядущем тысячелетии холизм, – раньше или позже, – станет главной концепцией естествознания.

"Холизм не только созидателен, но и самосозидателен, и его конечные структуры гораздо более целостны, чем его первоначальные структуры". Я. Смэтс.

Но сначала – несколько слов о развитии идей редуктивизма в прошлом веке. Уже в начале 20-го века обнаружились дурные последствия гуманитарно-технической асимметрии. Происходящий тогда пересмотр понятий «бог», «вера» («*Бог умер*», - заявил Ф. Ницше в конце 19-го века) привёл к пересмотру бытовой парадигмы. Распалась система связей. Целостную систему сменило хаотическое движение нескоррелированных элементов. Это нашло отражение в искусстве: возникли аналитические расчленяющие концепции кубизма. Человека попытались разложить на составные части, на первичные элементарные формы. На аналитической стадии развития кубизма изображение предметов дробилось мелкими гранями. Человек, как индивидуальное существо перестал быть темой искусства.

Три столетия научной революции качественно изменили картину окружающего нас мира, привели к доминированию аналитического подхода во всех областях человеческой деятельности: науке, технике, искусстве, морали. Целостный, гармоничный мир исчез. Его место занял дисгармоничный и антигуманистический мир машин и техносферы. В середине 20-го века маятник пошел в обратную сторону. Развитие общей теории систем потребовало создания методологии рассмотрения сложных природных и общественных систем во всей их взаимосвязи. Началось движение от анализа к синтезу. В методологию науки вошёл системный анализ, в котором важное место занял синтез. Синтез – соединение различных элементов объекта в единое целое (систему). Система – множество элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, образующих определенную целостность, единство. Системный подход – направление методологии научного познания, в основе которого лежит рассмотрение объектов как систем в целостности выявленных в нём многообразных типов связей. Новые тенденции отразились, кстати, и в живописи. Так, второй стадией кубизма явился синтетический кубизм, тяготеющий к гармоничным декоративно красочным композициям. Увы! Для понимания и тем более управления современными эволюционными процессами в природе и обществе одного системного подхода мало. Надежды сейчас возлагаются на развитие идей холизма, как философии цельности.



А кто такой «фактор цельности» и как он связан с мыслящей оболочкой земли (ноосферой) покажет будущее.

Так или иначе, но мы еще не раз вспомним расистского фельдмаршала Яна Смэтса, давшего надежду на избавление от всевозможных кризисов и заложившего основу всего современного естествознания (и будущей системы образования, возможно).

Теперь несколько слов о частном случае холизма – синергетике.

Рис. 2. Р.Фуллер – автор термина синергетики.

Автором термина **синергетика** является Ричард Бакминстер Фуллер (*Richard Buckminster Fuller*; 1895–1983) – дизайнер, архитектор и

изобретатель из США. Личность уникальная, не хуже Яна Сметса. В своём роде, конечно... Например, не имея законченного образования, он в конце жизни получил множество почётных докторских научных степеней и полсотни международных премий. Основным его изобретением является лёгкий и прочный «геодезический купол» – пространственная стальная сетчатая оболочка из прямых стержней. Геодезические сферы (структуры из треугольных компонентов, покрывающих поверхность сферы) позволяет строить сферы практически неограниченных размеров. Он предложил идею "девятого неба", т.е. воздушного жилища, изготовленного из



гигантских геодезических сфер, которые способны парить за счёт слегка нагретого воздуха. Такой шар поднимает существенную массу, что позволяет строить летающие мини-города с населением в несколько тысяч человек. Подобные «девятые небеса» могли бы стоять на привязи, или быть свободно парящими, или мигрировать в зависимости от климатических условий.

Рис. 3. Геодезический купол Фуллера.

(Напомним, что новая аллотропная форма углерода была названа в честь Фуллера фуллереном). Информацию он рассматривал, как отрицательную энтропию. Фуллер опубликовал две книги: "Синергетика: исследование: исследование геометрии мышления" (в соавторстве с Е. Эпплуайт, (1975) и "Синергетика 2: дальнейшие исследования геометрии мышления" ((в соавторстве с Е. Эпплуайт, 1979), в которой высказана идея об упаковке шарами как основе организации пространства. Под синергетикой Фуллер понимал геодезическую синергию, т.е. новую векторную геометрию, следствием которой и являются геодезические купола.

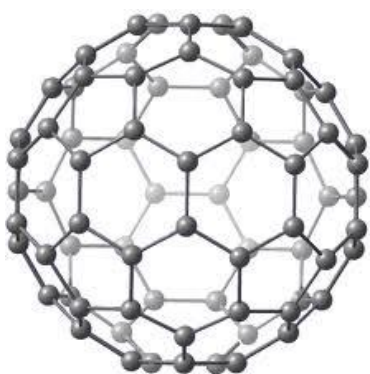


Рис. 4. Молекула фуллерена.

Определение термина «синергетика», близкое к современному пониманию (междисциплинарное научное направление, задачей которого является изучение природных явлений и процессов на основе принципов самоорганизации систем), ввёл немецкий физик-теоретик Герман Хакен в 1977 в своей книге «Тайны природы. Синергетика – учение о взаимодействии». Именно он считается основателем науки синергетика. Согласно Хакену синергетика относится к направлению универсализма, занимающего промежуточное место между редукционизмом и холизмом. Синергетика не сводит поведение системы ни к её поведению на микроскопическом уровне (редукционизм), ни к её макроскопическому поведению (холизм), она пытается понять, как устанавливается и функционирует связь между этими двумя уровнями. Это удастся ей благодаря понятию параметров порядка и принципу подчинения.

Фуллер мечтал об эре "всеуспешного образования и обеспеченности человечества". Обеспеченность человечества – дело тёмное, но идею "всеуспешного" образования мы обсудим на семинарах нашего университета.

КОМПЛЕМЕНТАРНОСТЬ НАУК



Подобное притягивает подобное (третий закон слияния).

Противоположности сходятся.

Противоположные по знаку заряды притягиваются, проводы с одинаковым направлением тока отталкиваются.

При создании университетов междисциплинарного образования, при развитии междисциплинарного мышления, прежде всего предстоит выяснить, какие именно науки и какие дисциплины можно объединить в некие кластеры, а с какими этого сделать невозможно. С этой целью следует классифицировать науки по принципу их комплементарности.

Комплементарность – соответствие, взаимодополняемость, взаимосоответствие, т.е. взаимное соответствие и дополнение

частей при образовании целого.

Примеров взаимодополняемости мы знаем множество: замок и ключ, болт и гайка, фаллос и влагалище, кинжал и ножны, ступка и пестик, молекулы биополимеров образующие связи с взаимодополняющими молекулами, спирали молекул ДНК, адсорбат – адсорбент, игры пазл, лего, тетрис и т.п.

Болт и гайка внешне не похожи друг на друга, но они могут образовать единую прочную конструкцию. Но могут и не образовать. Для создания крепления болт и гайка должны быть комплементарны, т.е. не только диаметры болта и отверстия совпадать, но и одна резьба точно идти по другой (желательно без смазки).



Рис. 5. Болт и гайка.

В психологии и социологии комплементарность – это неосознанная симпатия к одним людям и антипатия к другим, симпатия одного народа к другому народу и антипатия к третьему. Проблему комплементарности этносов осветил в своей теории этногенеза Лев Гумилев: *“Люди объединяются по принципу комплементарности”*. Комплементарность – это неосознанная симпатия к одним людям и антипатия к другим, т.е. положительная и отрицательная комплементарность. Вне зависимости от расового состава, от культурных связей, от уровня развития возникают какие-то свойства, которые дают возможность в одних случаях установить дружественный этнический контакт, в других – он становится нежелательным, враждебным и даже кровавым.

Мужчина и женщина образуют семью, если они комплементарны. Однако, есть вопросы, которые требуют уточнения: чтобы образовалась устойчивая связь между мужчиной и женщиной, нужна комплементарность их половых органов, или их душ также? Как провести диагностику комплементарности двух душ? Возможна ли комплементарная терапия? Можно ли ею управлять? Более того, чтобы дожить до золотой свадьбы нужна комплементарность и антикомплементарность: сходится подобное с подобным или сходятся противоположности, как учит нас Гегель? Почему прочные пары образуют тихие, скромные мужчины и женщины – отъявленные стервы?!



Рис. 6. Символ духовной и физической близости.

Потому, что не всё так просто.

*Они сошлись. Волна и камень,
Стихи и проза, лёд и пламень
Не столь различны меж собой.*

Они различны, но сошлись и подружились (что не помешало Онегину вскоре пристрелить Ленского, а Ленский первым возжелал замочить приятеля, да стрелял плохо).

В реальности, определить, кто кому комплементарен и кого с кем можно объединить в устойчивую структуру, достаточно трудно. Юноша хорош сам по себе и девушка хороша, но проживут ли они в любви и согласии весь век, или разведутся завтра – бог весть.

“Любовь зла - полюбишь и козла” – говорит народ.

Вот и вся комплементарность.

Но займемся лучше наукой, она как-то проще.

Принцип комплементарности лежит в основе самосборки биологических структур.

Комплементарность возможна, если поверхности молекул имеют комплементарные структуры, так что выступающая группа (или положительный заряд) на одной поверхности соответствуют полости (или отрицательному заряду) на другой. Комплементарность имеет место при взаимном соответствии противоположных электростатических зарядов на молекулах и энергий сопряженных реакций. В химии, молекулярной биологии и генетике она означает взаимное соответствие молекул биополимеров или их фрагментов, обеспечивающее образование связей между пространственно взаимодополняющими фрагментами молекул или их структурных фрагментов.

Нильс Бор, создавая основы квантовой механики, ввёл принцип дополнительности – наглядный пример комплементарности (русский термин комплементарность произошёл не от комплимента, а от *“complementary”* – слова, которое ввёл Н.Бор для обозначения своего принципа дополнительности; комплементарность активно занимался еще Пуанкаре, правда, не подозревая об этом).

Согласно Бору, для полного описания квантовомеханических явлений необходимо применять два взаимоисключающих («дополнительных») набора классических понятий, совокупность которых даёт исчерпывающую информацию об этих явлениях как о целостных. Например, дополнительными в квантовой механике являются пространственно-временная и энергетически-импульсная картины.

Корпускулярная и волновая модели описания поведения квантовых объектов не входят в противоречие друг с другом, потому что никогда не предстают одновременно. В одном и том же эксперименте нельзя одновременно измерить координату и импульс. Если в одной экспериментальной ситуации проявляются корпускулярные свойства микрообъекта, то волновые свойства оказываются незаметными. В другой экспериментальной ситуации, наоборот, проявляются волновые свойства и не проявляются корпускулярные. В зависимости от постановки эксперимента микрообъект показывает либо свою корпускулярную природу, либо волновую, но не обе сразу. Эти две природы микрообъекта взаимно исключают друг друга, и в то же время должны быть рассмотрены как дополняющие друг друга.

Бор выстраивал дополнительные пары: пространственно-временное описание частицы и волновые свойства частицы; частица и волна вероятности; физико-химические процессы и биологические процессы; мысли (логика) и чувства; математическое описание явления и физическая картина явления; истина и ясность; детерминированность и свобода воли; количество и качество. Существуют соотношения дополнительности между дискретным и непрерывным; конечным и бесконечным; анализом и синтезом; покоем и движением; мёртвым и живым; знанием и верой; разумом и сердцем; физикой и мистикой; наукой и искусством; материей и пустотой; мужским и женским началом; социализмом и капитализмом и др. Короче говоря, принцип дополнительности Бора является частным случаем дополнительности между рациональными и иррациональными аспектами действительности.

В философии комплементарными называют несходные или даже противоположные теории, концепции, модели и точки зрения, отражающие различные взгляды на действительность. **Замечание.** Одним из основных законов диалектики Гегеля является закон о единстве и борьбе противоположностей, который определяет развитие дополнительных (коллинеарных) пар. Проблема в нахождении принципов, по которым находить эти пары среди множества компонентов. В случае примера мужчина-женщина вопросов нет, здесь закон единства и борьбы противоположностей каждый знает по себе. Но являются ли тепло и холод противоположностями? Если в ванне, в которой я нежусь, температура изменится от 35 до 40 градусов, я это вряд ли замечу, да и борьбы особой не увижу, а если такую температуру показывает градусник больного, то в первом случае – он почти труп, а во втором – скоро им станет. Состояния явно различные.

Не всегда понятно является ли пара комплементарной: железобетон комплементарен? Сосуд сложной формы и жидкость в нём комплементарны? Как посмотреть! Что есть идеально комплементарная пара? Как определить допустимые пределы комплементарности? Очевидно, что если мы начнем увеличивать диаметр отверстия в гайке, то до какого-то момента гайка будет навинчиваться на болт и будет образовываться достаточно прочное крепление, но в какой-то момент гайка соскользнёт с болта. В какой? Возможны ли идеально комплементарные пары?

При попытке объединения двух наук сразу возникает вопрос: являются ли они комплементарными, образуют они дополняющие друг друга пары, способные создать единую конструкцию (например, мы имеем дело с болтом и гайкой, или болтом и шайбой)?

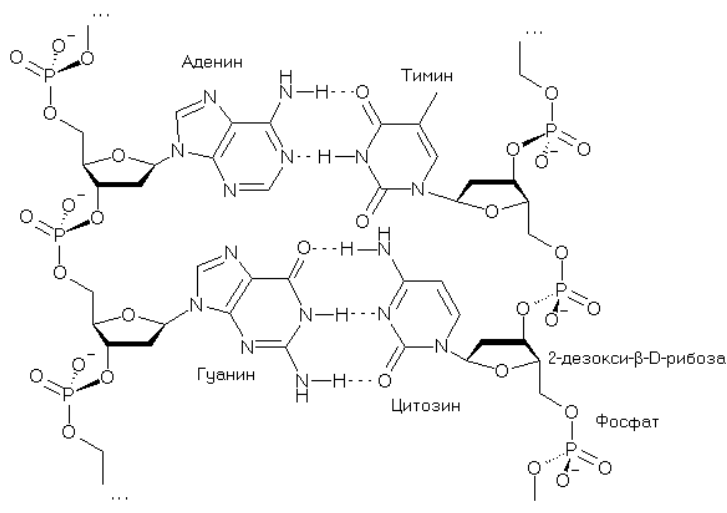


Рис. 7. Образование водородных связей при комплементарности молекул.

Понятно, что физику и химию объединить как-то можно, создав: физическую химию и химическую физику. В этих сферах часто невозможно точно сказать, находишься ли ты ещё в физике или целиком перебрался в химию. Проблема в том, что физическая химия и химическая химия отличаются друг от друга, сильнее, чем физика от химии! Как теперь их объединить в одну структуру? То же самое можно сказать, например, о химической экологии и экологической химии. Есть между ними что-то общее? Нет!

Можно объединить математику и лингвистику, медицину и физику, геологию и химию, можно образовать тройные комплексы: экологическая радиохимия, физико-химическая медицина и т.п. Но можно ли объединять математику с медициной, социологию с химией, а историю с религией – большой вопрос.

После выявления комплементарных объектов в науке, возникнет задача обучения этим наукам.

Объединение наук – задача не простая.

Обсудим проблемы на форумах.

НООСФЕРА

Эволюция будет продолжаться в более сложной области – в области духа.

Пьер Тейяр де Шарден

Одной из самых известных идей объединения "всего и вся" (или хотя бы науки с религией) была концепция ноосферы – сферы разума.

Впервые слово «ноосфера» прозвучало в стенах известного учебного заведения в Париже под названием Коллеж де Франс, на лекциях 1927/28 учебного года из уст философа и математика Эдуарда Леруа. В 1928 г. была опубликована его книга «Происхождение человека и эволюция разума», где термин ноосфера использовался уже довольно широко.

Леруа (Le Roy) Эдуард (1870–1954) французский ученый и философ, последователь А.Бергсона (интуитивизм и философия жизни – жизнь, как метафизически-космический процесс), представитель католического модернизма. Занимался математикой, палеонтологией и антропологией.

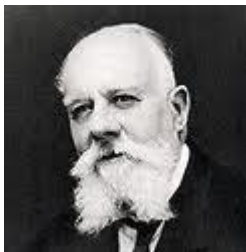


Рис. 8. Французский философ Э.Леруа, автор термина ноосфера.

Ноосферную концепцию разработал друг и единомышленник Леруа Пьер Тейяр де Шарден и изложил её в труде «Феномен человека», опубликованной после его смерти в 1955 году.

Тейяр де Шарден (Teilhard de Chardin) Пьер (1881-1955) – монах, член ордена иезуитов, двоюродный правнук атеиста Вольтера. Окончил колледж общества Иисусова. Ученая степень – геолог-палеонтолог. Французский геолог, палеонтолог, философ и католический богослов, реформатор католицизма. Один из первооткрывателей синантропа близ Пекина (1929). Развил концепцию «христианского эволюционизма», сближающуюся с пантеизмом. Его волновала проблема Человека, его происхождение, смысл бытия, будущее человечества. Шардена ставят в один ряд с выдающимися учёными всех времен и народов. Его попытка объединить науку и религию в познании мира не была признана ни религией, ни наукой. Шардену были запрещены чтение лекций в католическом университете и публикации его работ, т.к. он «недостаточно принимает во внимание различие между человеком и животным, и тем самым игнорирует вмешательство Бога», – такой вердикт вынесла церковь. Посмертная публикация работ Шардена также навлекла на автора осуждения, вплоть до изъятия его книг из библиотек. Указом Ватикана его работы были запрещены в связи с «фальсификацией веры». Ученые также не приняли Шардена, считая его теологом, а не учёным. Вызвали протест такие термины, как «Космогенез», «Христогенез», «Космический Христос».



Рис. 9. Пьер Тейяр де Шарден – французский геолог и богослов, развивший теорию ноосферы.

В России распространение этого учения связано с именем В.И.Вернадского, который попытался изменить концепцию – вместо

божественного разума, использовать человеческий. Идея не прошла: интеграция материализма и идеализма в рамках концепции ноосферы не удалась.

Вернадский Вл. Ив. (1863–1945) – естествоиспытатель, мыслитель, общественный деятель. Министр народного просвещения временного правительства (1917). В России считается основоположником современных наук о Земле – геохимии, биогеохимии, радиологии, гидрогеологии и др. В центре интересов – разработка целостного учения о биосфере, живом веществе, организующем земную оболочку) и эволюции биосферы в ноосферу, в которой человеческий разум и деятельность, научная мысль становятся определяющим фактором развития, силой, сравнимой по своему воздействию на природу с геологическими процессами. Учение Вернадского о взаимоотношении природы и общества оказало сильное влияние на формирование современного экологического сознания. Развивал традиции русского космизма, опирающегося на идею внутреннего единства человечества и космоса.



Рис. 10. Владимир Иванович Вернадский - российский учёный, пытавшийся примерить французскую философию с советской действительностью.

Как предполагалось объединить науку с религией в рамках ноосферной концепции?

Ноосфера (мыслящая оболочка) новое эволюционное состояние биосферы, при котором разумная деятельность человека становится решающим фактором ее развития. Понятие ноосферы введено французскими учеными Э.Леруа и П.Тейяром де Шарденом (1927). В.И.Вернадский развил представление о ноосфере как качественно новой форме организованности, возникающей при взаимодействии природы и общества в результате преобразующей мир творческой деятельности человека, опирающейся на научную мысль.

Термин Ноосфера («ноос» по-гречески – разумный дух) ввели французы: Эдуард Леруа и Пьер Тейяр де Шарден. Были ли они учёными? Вроде, да. Эдуард Леруа – математик, философ, занимался палеонтологией и антропологией. Тейяр де Шарден – геолог-палеонтолог, первооткрыватель синантропа. А на второй – нет, ибо Леруа – сторонник интуитивизма, рассматривавший жизнь, как метафизически-космический процесс, католик-модернист, а Тейяр – монах, член ордена иезуитов, католический богослов. Созданную ими концепцию Ноосферы нельзя отнести ни к науке, ни к религии. В познании мира она стремится **объединить** науку, философию, искусство и религию.

Как и аналогичные попытки скрестить кошку с собакой, идея вышла малопродуктивной. (Может быть – пока). Поэтому сейчас идёт не столько развитие Концепции, сколько ее выхолащивание. Учёные, берущие её на вооружение, первым делом удаляют из неё Божественный Разум, меняя его на человеческий, т.е. меняют божий дар на яичницу. Основных терминов Ноосферы: «Космогенез», «Христорогенез», «Космический Христос» и т.п. они избегают, но само понятие «Ноосфера» обожают. Есть в нем что-то возвышенное, какая-то мечта и надежда...

А что останется от учения, если выхолостить его суть? Одна оболочка! Она и существует...

Поскольку идея Ноосферы (хотя и в искаженном до неузнаваемости виде) бродит в науке (особенно в среде экологов), имеет смысл напомнить основные идеи Тейяра де Шардена, выраженные им в книге *«Феномен человека»*.

Пьер Тейяр де Шарден рассматривал жизнь как универсальную тенденцию космического процесса. Очеловечивание жизни – такой же великий скачок планетарного и космического развития, как оживотворение материи. Появление человека – дальнейшее развитие биосферы, новый виток эволюции. Человек, его разум – это новая оболочка планеты, новая сфера, сфера мысли – ноосфера. В ней завершается после более чем шести миллионов лет биосферное **усиление цефализации**. Сфера разума, новая оболочка Земли, как бы наложена на биосферу, оказывает на неё всё большее, преобразующее развитие. Через философский, нравственный поиск, искусство, науку, все формы культуры идёт увеличение объёма общеземного мозга.

Все мы что-то слышали об эволюционной теории Дарвина: от низших к высшим, от обезьяны к человеку, борьба видов, естественный отбор и т.п. Ну, а сейчас эволюция органического мира Земли продолжается? Где-нибудь очередная обезьяна переходит в человека, или, наоборот, человек – в обезьяну? Эволюционирует ли в наше время биосфера, как целое? И если эволюционирует, то в какую сторону?!

Ответ: эволюционирует! Борьба за существование продолжается. Организмы приспособляются к меняющейся среде обитания. Правда, серьезных изменений в системе обезьяна-человек не обнаружено, и человек в нечто более высшее не смутировал, но тенденции развития просматриваются. Кое что недавно обнаружилось, например, повышение видового разнообразия, тенденция к переходу к замкнутым циклам, от гетеротрофного к

автотрофному метаболизму. Организмы стремятся к более полному использованию энергии, пространства и вещества. Заметное изменение претерпели размерные спектры живых существ: они расширяются, причем вклад крупных особей увеличился. Если для какого-то конкретного вида животных построить график, отложив по оси абсцисс размер особи, а по оси ординат – число особей данного размера, то обнаружим, что график с течением времени изменяется – он расширяется как в сторону мелких, так и в сторону крупных животных. Важно, что в последнее время доля крупных организмов в размерном спектре существенно увеличилась. Возникшие крупные особи обладают более длительным и сложным жизненным циклом, реализуемым посредством большого объёма генетической информации. В природе идёт постепенное замещение метаболических (вещество, энергия) связей в сообществе сенсорными.

Важным процессом является **цефализация** (Кефале, по-гречески – голова. Мозг развивается и укрупняется. Развивается и нервная система. Увеличивается вклад в суммарную биомассу организмов с развитой нервной системой, проявляющейся через химический состав живого вещества. При этом в суммарной биомассе повышается содержание компонентов, специфических для клеток, специализирующихся на обработке информации. К цефализации биосферы несомненно относится «демографический взрыв» – рост населения планеты. В настоящее время численность людей возрастает по гиперэкспоненте. Биосфера явно эволюционирует в сторону увеличения в своём составе количества клеток, перерабатывающих информацию. «Информационно-биологический взрыв» – прирост суммарной массы вещества мозга – составил в XX веке несколько мега тонн. Важен не только рост человеческой популяции. Резко увеличились потоки энергии, вещества, информации, циркулирующие внутри человечества или связывающие его с окружающей средой.

Шарден утверждал, что мир – живой организм, пронизанный Божеством и устремленный к совершенству. У корней эволюции стоят творческие силы Космоса, которые разворачиваются постепенно, и в ходе развития, достигая критической точки, устремляются к высшему синтезу – Ноосфере. Эволюция планеты – спонтанное развитие живой массы, которое становится условием возникновения человека. Человек не является вершиной пирамиды жизни, а такая же форма жизни, как и все другие её формы. *«Человек – обычный луч, образующий веер жизни... Особенностью этого феномена является мысль. Весь вопрос в том, в какой мере этот феномен подчиняется силе Космоса».* Происхождение жизни – двуединый процесс эволюции планеты и Космического циклона, *«который нас всех породил, некоей высшей силы, объемлющей мироздание».* Эволюция носит циклический характер и *«нынешняя цивилизация включает в себе признаки совершенно нового биологического цикла».*

Шарден считал, что новый этап эволюции произойдёт при участии и усилиях всего человечества. *«Состоится вхождение твари в мир Божественной полноты».* Эта фаза мировой эволюции есть *«точка Омега».* Омега представляет собой то, что православные богословы называли *«соборностью»* – единение без смешения, **слияние без поглощения**. Омега – это нечто и некто, действующее с самого начала эволюции. Эволюция – это поток, становление, гибель и рождение. Омега – это Бог. Она наличествует всегда, так как стоит вне времени.

Развитие будет происходить, прежде всего, в коллективной и духовной форме, где дух и сознание создадут условия для образования единого человечества вне наций и рас. Человек – кульминация спонтанной бессознательной эволюции, но вместе с тем и некое *начало*, сосредоточившее в себе предпосылки для нового, разумно направленного этапа эволюции. Человечеству только предстоит прийти к истинному самосознанию, к действительному управлению эволюцией мира и самого себя. Только тогда и произойдёт создание высшего порядка сосуществования, порядка духовности.

Становление новой цивилизации – это переход к новому витку эволюции, заключительному этапу становления Ноосферы. Ноосфера будет развиваться по направлению, соединяющему науку и религию, и сосредоточено будет на человеке. *«Человечество отягощено старыми привычками и не осознает, что живет уже в новую эпоху, и что уже высвободились новые силы, которыми нужно научиться управлять...».* *«Люди должны посвящать свою жизнь увеличению знаний, а не имуществу».*

Шарден оптимист: он верит, что человечество под влиянием сил планетарного сжатия и внутренних сил одухотворения проложит путь к новому витку, когда ноосфера «найдет свои глаза». Пока «человеку достаточно самого себя, его разума, вместо веры и религии. Но по мере роста напряженности становится очевидным, что **нужен синтез науки и религии**, так как они одушевлены одной жизнью». Вера в прогресс питает науку, *«научный поиск невозможен без мировой этики, которая заложена в религии, для совершенствования общества».*

Соединение науки и религии неизбежно. Наука – это история, религия – это будущее, наука и религия – это единый акт познания, охватывающий прошлое и будущее. *«Человеческому духу самой историей предназначено идти этим путем.».* *«Мы вступаем в новую стадию эволюции, о которой мало знаем. В Ноосферу – сферу разума...Покров сознания здесь*

коллективный и суммарный продукт миллионов лет мышления. Мощность этого разума определить сейчас невозможно, но она велика».

«Конец света» – это критическая точка Ноосферы, когда под действием горячих лучей Омеги прекратится ненависть и междоусобная борьба. Побежденное чувством Земли, зло на завершающем этапе будет находиться в минимуме, а доля добра будет возрастать. Переход этот представляется как процесс социализации человечества. «Чем больше человек технически организует свое множество, тем больше в нём возрастает психическая напряженность. Но, окружив разнузданным индивидуализмом, циклон, который нас произвел и который кружит над нашими головами, стремится довести нас до завершенности и органически связать друг с другом. Социализация человека – это ось космического вихря, – завершающий этап создания мыслящего универсума». «Человеческая зоологическая группа не отклоняется биологически под действием разнузданного индивидуализма от необходимости объединения в масштабах планеты и в критической точке объединит коллективный разум для перехода в новую фазу развития. Если один человек может допустить свое физическое уничтожение, то человечество начнет отдавать себе отчет перед лицом полного уничтожения, что ему необходимо объединить усилия, так как продвигать Землю становится слишком трудно, если мы трудимся для Вечности».

Шарден показал, что материя и дух – два аспекта физической реальности, и тем самым проложил путь для дальнейшего процесса познания мира.

Но Шарден не исключает и другой путь развития. *«По закону, которого в прошлом еще ничто не избежало, зло тоже может возрасть одновременно с добром и достигнет к финалу своей высшей ступени». Не исключено, что «отказавшись от Омеги и коллективизма, разобщенный человек спровоцирует конфликт, и объединенная ноосфера снова разъединится на две зоны – мысли и любви, которые будут опять в состоянии антагонизма. Тогда произойдет кончина Земли, по всем признакам соответствующая гипотезе традиционного Апокалипсиса – смерть исчерпавшей себя планеты».*

Объективный процесс «создания ноосферы из биосферы» есть природное явление, более глубокое и мощное в своей основе, чем человеческая история, и остановить его нельзя. Неизбежной предпосылкой перехода в новую стадию истории Земли (а не только истории человечества) является единение человечества, проявление его как единого целого. Человек должен научиться мыслить и действовать в новом аспекте, «не только в аспекте отдельной личности, семьи, рода, государств или их союзов, но и в планетарном аспекте», в биосферной оболочке планеты.

В период перехода биосферы в ноосферу необходима «интеграция науки с другими формами общественной жизни – искусством, литературой, философией, религией». Религия в течении тысячелетий являлась могущественным социальным фактором, способствующим эволюции биосферы в ноосферу, так как несла в себе этические начала. Научная работа без этической и философской стороны, без оценки с точки зрения добра и зла бессмысленна.

В.И.Вернадский так же считал, что человечество вступает в новую эпоху жизни. *«Мы присутствуем и жизненно участвуем в создании в биосфере нового геологического фактора, небывалого еще в ней по мощности и по общности. Окончен продолжающийся многие сотни лет стихийный процесс развития цивилизации. Социальный вид животного – человек – охватил всю поверхность биосферы».* Он понимал, что человек становится «грозной геологической силой», что создается «*новая биогенная сила*», охватывающая своим влиянием всю планету, которую следует управлять разумом, научной мыслью.

Для Вернадского ноосфера – идеал высшего духовного Человека, который движет им в его работе (*Рай для человечества?*). Человек – единственное существо, которое живет не только тем, что есть, но постоянно соотносит свою жизнь с тем, что должно быть, и стремится к этому. Эта потребность «должного», с которым рождается человек, и создает новую ноосферную оболочку Земли. Вернадский – один из первых «антропокосмистов». Антропокосмизм является полной противоположностью антропоцентризму, не только ставящего человека в центр мироздания, но и отрывающего его от природы, от своих «меньших братьев» по эволюции, от космоса. Антропокосмизм спускает человека с его трона исключительности и включает его в космическую эволюцию, как «одну из органических составных частей» и этапов развития космического целого. Человек не отделен от судеб космического развития. Но возникает и обратная связь – человек становится одним из мощных факторов эволюции, действуя сознательно. И это налагает на него огромную ответственность. Вернадский считал, что наука, оторванная от религии и философии, не может дать полной картины мира.

Итак, концепции Ноосфера скоро 100 лет. Получила ли она за это время реальное развитие? Нужна ли она нам теперь? Поможет она объединить науку, философию, искусство и религию в одно целое? Способна эта идея объединить народы?

Нужен нам факультет Ноосфера?

Давайте подумаем вместе.

ЕДИНСТВО И БОРЬБА ПРОТИВОПОЛОЖНОСТЕЙ

Жить значит умирать
Ф.Энгельс

Когда-то в юности мы изучали диалектику Гегеля (в трактовке Ф.Энгельса, естественно). Тогда же узнали о втором законе диалектики – законе единства и борьбы противоположностей, который формулировался так: *«Движение и развитие в природе, обществе и мышлении обусловлено раздвоением единого на взаимопроницающие противоположности и разрешением возникающих противоречий между ними через борьбу»*.

Философия забылась, но недоумение осталось.

Надо ли это понимать так, что когда-то существовало нечто единое, которое вдруг раздвоилось на Бога и Чёрта, которые немедленно вступили в борьбу и положили начало развитию всего и вся? С какой стати материя подралась с энергией, волновая природа элементарной частицы с материальной, женщина с мужчиной (хотя это как раз понятно), а цвет яблока с его вкусом? Борьба добра со злом – источник прогресса?

К тому же, кто бы объяснил, что такое единство и что такое противоположности, что непрерывно в борьбе пребывают.

Единство противоположностей представить ещё можно: полюса магнита противоположны, но северный полюс магнита не может существовать без южного и наоборот. И если мы разделим магнит на две части, то это не будет означать, что мы сможем получить в одной части «север», а в другой – «юг». Путь на Восток, есть путь на Запад. Но где здесь и зачем борются противоречия?

Гегель писал: *«Противоречие есть корень всякого движения и жизненности, лишь поскольку оно имеет в самом себе противоречие, он движется, обладает импульсом и деятельностью»*. Разрешение любых противоречий представляет собой скачок, качественное изменение данного объекта, превращает его в качественно иной объект, отрицающий старый.

Хорошо, но непонятно!

Если есть противоречие, то есть развитие. Пусть так.

А.С.Пушкин был пылким мужчиной, а его Натали – холодной меланхоличной женщиной, к сексу не склонной. Это противоречие привело к борьбе противоположностей в рамках брачного единства – в короткий срок родилось четверо детей. Но следует ли из 2-го закона диалектики, что если муж и жена оба склонны к сексу, без каких-либо противоречий, то ни детей, ни какого иного развития у них не будет?

Выходит, что если противоречия нет, то и развития нет?! Странно это...

«Основной стороной диалектических противоположностей является взаимное отрицание сторон и тенденций, именно поэтому стороны единого целого суть противоположности, они находятся не только в состоянии взаимосвязи, но и во взаимоотрицании».

Ключ и замок находятся в состоянии взаимосвязи: ключ поворачивается, качественный скачок есть: дверь была закрыта, а теперь открыта, движение в наличии. Есть противоположности, есть единство. Но кто кого здесь взаимоотрицает и кто с кем борется?



Рис. 11. Единство, противоположность и борьба ключа с замком.

Теория комплементарности утверждает, что чем точнее подходят очертания компонентов, тем сильнее взаимодействие между ними. Действительно, психологи свидетельствуют, что для партнеров залогом счастливых отношений является совпадение по возможно большему количеству параметров, как то социальное положение, круг интересов, возраст, темперамент и т.д., т.е. чем менее противоположны противоположности, тем более вероятно, что сольются они в партнерском единстве. Но диалектика

говорит противоположное: сходятся как раз противоположности, а то, что мужчина и женщина – противоположности никто не спорит (есть профессор-биолог, который доказывает, что это вообще разные виды животных). Вступая во взаимоотношения, мужчина и женщина сталкиваются в лице друг друга с миром не просто отличным от их собственного, а в корне другим. Мужское и женское начала имеют разные духовные корни и реализуют разные жизненные программы. Но, как ни странно, диалектика ближе к реальности, чем теория комплементарности: различие женского и мужского начал (антикомплементарность), хоть и абсолютно, но подчинено одной задаче, и это делает их едиными неотъемлемыми частями целого. Борьба и единство противоположностей выступает во всей красе, продукты взаимодействия пополняют ноосферу. Тут и без философии понятно: чем меньше партнеры похожи друг на друга, тем более захватывающими становятся их

отношения, ведь любовь, построенная на контрасте как контрастный душ – будоражит и бодрит. Впрочем, диалектика – диалектикой, а меру знать надо, заиграешься – развод.



Так для создания пары мужчина и женщина должны быть комплементарны или антикомплементарны? Комплементарность – величина постоянная или она меняется во времени? В школе они были антикомплементарны, в институте – комплементарны и поженились, в зрелости опять заантикомплементарились и развелись. Может быть такое? Если да, то нам надо ввести понятие динамики комплементарности. Интересно как это сделать. Когда резьба на болте сточится, и он не станет сцепляться с гайкой? Создайте математику, ребята.

Можно найти и другие примеры второго закона. Например, два мужика долбят одноместное каноэ. Единство понятно – одному с бревном не справиться, противоположность ясна тоже – плыть-то одному, так что кого-то ближе к концу работы замочат, противоречие разрешится, качество сменится (а может и количество, если перебыют друг друга, и каноэ сгниет на месте). Но насколько многообразны такие примеры? Кинжал и ножны, хоть и противоположны друг другу, но в никакую борьбу не вступают, и вполне довольны друг другом.

Но оставим сложные темы и перейдём к более простому – естествознанию.

К единству и борьбе противоположностей в физических процессах относят принцип корпускулярно-волнового дуализма, согласно которому любой объект может проявлять как волновые, так и корпускулярные свойства. Считается, что в биологической эволюции именно путём борьбы наследственности и изменчивости происходит становление новых форм жизни. Принцип единства противоположностей, понимаемый в том смысле, что гармония и порядок являются продуктом синтеза двух противоположных сил,

реализуется, например, в процессе вращения Земли вокруг Солнца, являющегося результатом действия противоположных – гравитационных и центробежных – сил. Тот же самый закон можно наблюдать и в процессе образования соли в результате химического взаимодействия кислоты и основания. Среди других примеров можно упомянуть атом (как единство положительного и отрицательного заряда), жизнь (как процесс рождения и смерти), а также явления магнитного притяжения и отталкивания.

Закон единства и борьбы противоположностей используется для объяснения внутренней энергии, присущей природе. На вопрос об источнике движения материи диалектический материализм отвечает просто: материя обладает свойством самодвижения, являющимся результатом взаимодействия противоположностей, заключённых в ней; такого рода взаимодействие рассматривается как противоречие. При таком подходе нет необходимости в постулировании некоего «перводвигателя», который бы давал толчок движению планет, молекул и других материальных объектов. Как писал Гегель "Противоречие является источником всякого движения и жизни в целом".

В один прекрасный момент в Космосе взорвалось сингулярное состояние (концепция Большого Взрыва), продукты начали разлетаться (и разлетаются до сих пор), образовались изотопы элементов, звезды, Солнце, Земля, ну и мы, естественно. Все произошло само собой, из-за внутренней борьбы чего-то с чем-то. Бог не понадобился.

Логичная теория, но только истинна ли она? То-то Бог, сидя на облаке, посмеивается в бороду. Он-то знает, кто сотворил Вселенную, и в чём состояла борьба и единство противоположностей.

Материалисты полагают, что в самой материи заложены стимулы, механизмы, причины всех изменений и превращений. Природа сама развивается по собственным законам от низших форм к высшим. Неживая природа в результате действия собственных причин породила живую природу.

Единство и борьба противоположных сторон свойственны всем явлениям.

В математике это плюс и минус, дифференциал и интеграл; в механике – действие и противодействие; в физике – положительный и отрицательный заряд; в химии – соединение и диссоциация атомов; в биологии – обмен веществ; в общественной жизни – различные формы взаимоотношения классов. Уже самая простая форма движения материи – механическая – обладает внутренним противоречием (оно дискретно и непрерывно). Согласно апории Зенона стрела летит и покоится одновременно.

Движенья нет, сказал мудрец брадатый.

*Другой смолчал и стал пред ним ходить.
Сильнее бы не мог он возразить;
Хвалили все ответ замысловатый.
Но, господа, забавный случай сей
Другой пример на память мне приводит:
Ведь каждый день пред нами солнце ходит,
Однако ж прав упрямый Галилей.*

Взаимоотношение противоположностей в составе единого целого выступает как диалектическое противоречие. Земля и другие планеты в результате действия закона всемирного тяготения притягиваются Солнцем. Но в то же время вращение планет вокруг Солнца создает противоположную силу – центробежную. Постоянное взаимодействие центробежных и центростремительных сил создаёт определенное равновесие. Атом существует и действует благодаря взаимодействию положительных и отрицательных частей: протонов (+) и электронов (-). Сами элементарные частицы имеют противоречивую природу – это волны и корпускулы. Это диалектическое противоречие объясняет и природу света.

Единство и борьба противоположностей присущи всем явлениям природы и общества. Не являются исключением в этом смысле и человеческое познание, мышление. Познание есть непрерывное преодоление противоречия между безграничной возможностью познания человеком природы и невозможностью в каждый исторически определенный момент познать мир до конца, исчерпывающе, абсолютно. Впрочем, если бы даже людям удалось бы познать мир, то процесс познания на этом бы не остановился, ибо мир все время движется, изменяется. Налицо диалектическое противоречие: мир принципиально познаваем, но, с другой стороны, – его нельзя познать абсолютно, до конца.

Для того, чтобы противоположности взаимодействовали, они должны быть комплементарны, идеально притерты друг к другу (эффект взаимной диффузии). Но взаимодействия бывают разными: возможно содействие, борьба или нейтралитет. Взаимодействия подразделяются на слабые и сильные, разрушающие и созидающие, характеризующиеся открытой борьбой, взаимоисключением сторон, и наоборот, объединяющие, взаимностимулирующие стороны.

Отдельные взаимодействия изучаются конкретными науками. Исследование же связей и взаимодействия в целом – одна из фундаментальных философских проблем.

И наша проблема тоже.

При попытке объединить конкретные науки, при создании основ междисциплинарного мышления, мы неизбежно столкнемся с действием закона единства и борьбы противоположностей. Приведёт ли это к созданию супернауки, или конкретные науки уничтожат друг друга?

Посмотрим...

РИСК И СВОБОДА

*Ничто так не освобождает человека, как знание.
Иван Тургенев*

– *Свобода – осознанная необходимость*, – сказал однажды Бенедикт Спиноза.

Может быть, может быть....

Всё же практичнее: *свобода – пространство доступных альтернатив*. Свобода зависит от числа различных путей, по которым можно отправиться в путешествие, но не всех путей, а лишь доступных для человека, животного или машины. У троллейбуса одна степень свободы – двигаться вперёд, у теплового – две (вперёд-назад), у автомобиля степени свободы неограниченны, но только в одной плоскости – по асфальту, вертолёт перемещается уже по всем трём направлениям, да только в воздухе, под водой он не летает. Человек может бегать и плавать, но летать он не способен. Ни что в природе не мешает ему воспарить, да крыльев нет.

Лежит камень в степи, а под него вода течёт.

И на камне написано слово:

Кто направо пойдёт – ничего не найдет,

А кто прямо пойдёт – никуда не придет,

Кто налево пойдёт – ничего не поймет

И ни за грош пропадет.

У витязя на распутье 5 степеней свободы: пойти прямо, вправо, влево, назад или остаться на месте, где и заночевать. Но везде опасность и везде риск (мера опасности). Витязь должен выбрать свой путь, т.е. запланировать свой риск.

Но мало того, что у человека заужено пространство альтернатив по каким-то реальным причинам (*мужчина рожать не может*), он не пользуется теми возможностями, что у него есть.

По многим дорогам он не пойдёт по идеологическим, религиозным или нравственным причинам, хотя, казалось бы, они вполне доступны.

"Вор никогда не станет прачкой!"

или, из той же оперы:

*"Из нас вовек
не сделать тех,
кем бы могли мы стать!"*

Каждый сам планирует свой риск, и в этом смысле сам определяет свою свободу.

- *Жениться или не жениться?* – вопрошал Сганарель в пьесе Мольера. Мужик боялся риска, но это ему не помогло: был побит и женился.

Буриданов же осёл так и не решил, с какой охапки сена начать есть, так и сдох от голода.

Создание нового университета – расширение пространства альтернатив, а значит – свободы, но и большой риск, однако. Риск его создателей – не справиться с задачей, что вполне вероятно, ибо нужно обеспечить преподавание предметов, по которым не готовит ни один университет в мире, причём не отдельных предметов, а их совокупностей и не просто совокупностей, а тех наук, которые до сих объединить не удалось, и, возможно, не удастся. Риск учеников – потерять время, так и не став универсальным специалистом. Да и нужны ли обществу универсальные специалисты? Это – вопрос...

Риска нельзя избежать, но его можно оптимизировать.

Посмотрим, что здесь сделать можно.



ИНФОРМАЦИЯ, ИНФОРМАТИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При попытке единения каких-то наук полезно вспомнить, что современная концепция мироздания строится всего на нескольких понятиях: вещество, энергия, пространство, время и информация. Именно они должны пронизывать всю систему образования.

Начнём с информации, рассмотрим фундаментальную науку – информатику и кончим информационной технологией и её ролью в объединении наук (и не только наук – информационная технология, как сверхтекущий флюид, проникла во все сферы жизни и деятельности как отдельного человека, так и общества в целом).



Впрочем, информатика занимается информацией как таковой, без какой-либо привязки к человеку и вообще какому-либо разуму, пусть даже ноосферному. Она вообще не связана с живой природой: судьба молекул в расширяющемся сосуде, разбегание галактик, химические реакции и т.д. и т.п., любые явления, связанные с порядком и хаосом, – везде, где царствует

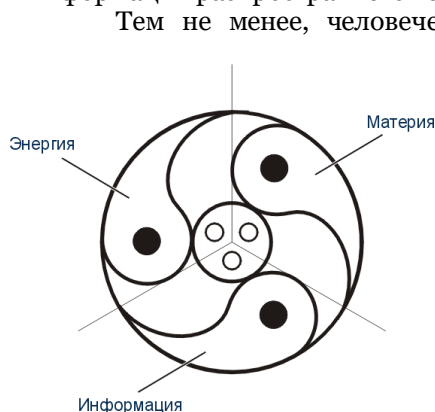
энтропия, там же правит и её альтер эго (*Alter ego*) – информация.

"Если где-то лисий хвост, значит где-то Лиска"

Там, где информация, там и информатика.

Если неживой природе информацию навязывает человек (информация оторвана от материального носителя), то живая природа активно и непосредственно использует информационный обмен. Пчёлы, сообщающие в улей информацию о местонахождении цветов с нектаром, сойка, благим матом оповещающая лес, что в него вошёл человек, токующий глухарь, гусь, собравший стаю, и обеспечивший благополучный перелёт на несколько тысяч километров – лишь отдельные примеры. Важно здесь, что информатика обходится без каких-либо научных оснований, технологий и компьютеров.

Без наук обходятся кумушки на завалинке, сплетники, мифотворцы и клеветники. Даже мой сосед оповещает о появлении чешского пива в киоске за углом простым ударом кулака в стену. Информатика распространяется без технических средств, и весьма интенсивно.



Тем не менее, человечество разработала множество технических средств передачи и хранения информации. В отличие от животных, человек предпочитает накапливать информацию. За время своего сравнительно недолгого существования человечество накопило значительные информационные ресурсы: книги, учебники, статьи, патенты, диссертации, отчёты, картины, фильмы, патенты, записки очевидцев и т.д. и т.п. Быстрый рост вызван тем, что информационные ресурсы (в отличие от других видов ресурсов – трудовых, энергетических, минеральных и т.д.) тем быстрее растут, чем больше их расходуют.

Понятно, что человечество занималось обработкой информации тысячи лет, прекрасно обходясь без определения понятия «информация», без науки Информатики, используя информационную технологию на базе канцелярских счётов,

письменности и наскальной росписи.

Информатика – наука, изучающая общие свойства и процессы отражения материи, порядок в материи, её структурированность и отражение в сознании человека, общества.

Человек всегда разрабатывал способы передачи информации: тамтамы, сигнальные огни, голуби, посланники-вестники, почта, телеграф и т.п. Первое осмысление, первые теоремы и первые теории в Информатике появились после появления радио и азбуки Морзе, когда возникла проблема оптимизации передачи больших объёмов информации и появилась задача передачи информации без искажений.

Мощный всплеск развития информатики и информационной технологии начался после изобретения компьютеров и создания сети Интернет.

Компьютеры (слово компьютер произошло от слова вычислять) сначала предназначались для математического моделирования и обработки данных. Затем они оказались полезными для манипулирования с текстовой, графической, визуальной, аудио- и видео- информацией. На базе компьютеров создана такая мощная информационная система, как Интернет. Система Интернет базируется на компьютерах (хотя и не связана с конкретными носителями, разрушение многих из них не отразится на работе Интернета в целом), но выход в систему не требует от пользователя обязательного использования компьютера. *Бедуин, пересекающий на верблюда Сахару, выходит в Интернет и уточняет путь по мобильному телефону.* Тем не менее, современные электронные компьютеры, несмотря на всю свою примитивность (можно даже сказать – убожество) играют в информационных технологиях важную роль.

Жаль, конечно, что разрекламированные квантовые компьютеры, так и не появились, искусственного интеллекта пока не видать. Ну, что есть, то есть...

Успехи по внедрению компьютеров в Информатику оказались настолько велики, что появились учёные-преподаватели, понимающие под Информатикой компьютерные науки и компьютерные технологии. Такой подход напоминает садовода, излагающего свой предмет, как науку и технологию применения лопат, вил и граблей в растениеводстве, или врача, призывающего диагностировать рак по показаниям градусника под мышкой.

Мы с вами так поступать не будем. Подавляющая часть лекций будет посвящена информатике, как таковой, и только в конце сказания обратим внимание на компьютеры и посмотрим, куда их можно с пользой приспособить.

Сказанное, естественно, не отменяет того обстоятельства, что сегодня важнейшей составляющей образованности человека является свободное владение информационными технологиями, так как деятельность людей всё в большей степени зависит от информированности и способности эффективно использовать информацию. Сегодня квалифицированный специалист любого профиля (как технического, так и гуманитарного) должен уметь находить, обрабатывать и использовать информацию с помощью компьютеров и других вычислительных и телекоммуникационных средств, попавших ему под руку. Знания информатики и информационных технологий – необходимые требования профессиональной пригодности в XXI веке.

Фундаментальность информатике придаёт широкое и глубокое использование математики, формальных методов и средств, общность и фундаментальность её результатов, их универсальная методологическая направленность в производстве знаний. В этом смысле математическая информатика аналогична "наукам на стыке": математической физике, химической физике, медицинской радиохимии и др.

Однако, прежде, чем информатику делать осью, на которую насаживать различные науки, имеет смысл сначала объединить различные части самой Информатики, которые успели

разбежаться уже довольно далеко. Таких частей, по крайней мере, четыре: 1. Физическая (термодинамическая и статистическая, равновесная и неравновесная); 2. Техническая информация (передача информации по линиям связи; описание комбинаторным, вероятностным и алгоритмическим способами); 3. Компьютерная информация (перемещение и хранение информации в компьютере; компьютерные науки во всей красе; система Интернет); 4. Смысловая информация (семантическая информация и дезинформация, СМИ; *"одна баба сказала"*, способы поиска, переработки, хранения и защиты). До пятого вида информации – квантово-механического – мы, скорее всего, не доберёмся. А вот информационным парадоксам мы уделим серьёзное внимание. В конце-концов займёмся практическими применениями информационных идей.

Информационные разделы кажутся сильно разными, мы их попытаемся объединить в одно целое с помощью энтропии и фрактальной геометрии, как мер порядка и беспорядка, т.е. детерминированного хаоса.

Напомню, что наша цель не столько объединение разных наук, сколько объединение преподавания этих наук.

Кому интересно - переходите в раздел ИНФОРМАТИКА

ПОРЯДОК И БЕСПОРЯДОК

Хаос рождает жизнь, а порядок рождает привычку.

Генри Брукс-Адамс

Хаос и порядок так тесно связаны между собой, что их невозможно разделить.

Дипак Чопра. Путь волшебника



В мире есть порядок и упорядоченные структуры, есть беспорядок, есть хаос, т.е. беспорядок в абсолюте. Важно понимать, что есть детерминированный хаос, т.е. бардак, локально упорядоченный, со случайными процессами, которые частично предопределены и даже закономерны. Но не слишком!

Рис.1. Символ хаоса Майкла Муркока.

Рассмотрим особенности детерминированного хаоса в конкретных науках, социальных и политических процессах.

Начнём с порядка. Казалось бы с этим просто:

Порядок – гармоничное, ожидаемое, предсказуемое состояние или расположение чего-либо.

Упорядоченность – характеристика структуры, обозначающая степень взаимной согласованности её элементов.

Для физиков-химиков это, например, упорядоченное в пространстве расположение атомов или молекул, или развитие по спирали. В кристаллах порядок может быть ближним и дальним. В семейной жизни порядок, это если можно ходить по квартире, не спотыкаясь о разбросанные вещи.

Но в обществе всё сложнее:

Анархия – мать порядка, хаос порядка отец.

"Свобода не дочь, а мать порядка!" – сказал как-то П. Ж. Прудон – теоретик революции (*"Я – ваша мысль, меня убить нельзя!"*). И был прав, ибо, как вы создадите из одного порядка другой (хотелось бы – более совершенный) порядок, не сотворив предварительно сильный беспорядок? Ведь свободы в беспорядке гораздо больше, чем в порядке: помимо законных, установившихся путей появляются новые, неведомые, дороги, ведущие к непредсказуемым последствиям.

Тут будет к месту цитата:

Анархия по-гречески "безвластие", т.е. отсутствие в обществе централизованной насильственной власти. Это самоуправление во всех сферах жизни общества, при котором достигается максимально возможная степень свободы для каждого народа, территории, коллектива, для каждой отдельной личности. Анархия – это невозможность расширения прав одной личности за счёт другой. В отличие от демократии, принципом которой, является подчинение меньшинства большинству, выявляемое путем голосования, анархия предоставляет любому меньшинству жить так, как вздумается, если оно при этом не ущемляет свободу других. Поэтому лозунг "Анархия – мать порядка" означает, что анархия должна стать матерью будущего общественного порядка. Порядок будет основываться не на принудительном подчинении всех и каждого единой насильственной власти, а на добровольных взаимовыгодных соглашениях между отдельными лицами и группами на принципе добровольной

кооперации всех членов общества, при которой возникающие конфликты решаются третейским судом.

Но мы, пожалуй, отвлеклись. Вернёмся к естествознанию.

Непорядок – *нарушение или отсутствие должного порядка.*

Непорядок вовсе не означает беспорядок. В беспорядке главное – отсутствие *должного* порядка. Пример – на рис. 2. Все детали – в полном порядке, а в целом – безобразие, т.к. птички не живут под землёй в корнях деревьев. Поэтому картина отражает непорядок, т.е. ложный порядок, который реализуется в больной голове художника, а больше никак.



Рис. 12. Пример непорядка.

У порядка мало синонимов (возможно потому, что он редок) а у беспорядка – много:

Беспорядок, безалаберщина, беспутница, бестолковщина, бестолочь, неустройство, неурядица, нескладница, несогласие, ад, содом, разгром, столпотворение (вавилонское), светопреставление, кавардак, каша, путаница, разноголосица, разногласие, расстройство, замешательство, ералаш, передрыга, пертурбация, кутерьма, катавасия, сумятица, сутолока, базар, шабаш, кагал, хаос.

Вот хаосом и займёмся.

Хаос (χάος от χαίνω – *раскрываюсь, разверзаюсь*) – категория космогонии, первичное состояние Вселенной, бесформенная совокупность материи и пространства. В обыденном смысле **хаос** понимают как беспорядок, неразбериху, смешение. Понятие возникло от названия в древнегреческой мифологии изначального состояния мира, некой «разверзшейся бездны» (а не беспорядочного состояния), из которой возникли первые божества. Лишь в раннехристианские времена этому слову стали приписывать значение беспорядка. В математике хаос означает аперiodическое детерминированное поведение динамической системы, очень чувствительное к начальным условиям. Бесконечно малое возмущение граничных условий для хаотической динамической системы приводит к конечному изменению траектории в фазовом пространстве. В биржевой торговле под словом "Хаос" подразумевают поступающую новую информацию, которая влияет на действия торговцев.



Рис. 13. От хаоса к порядку (и обратно).

Всё это – очень умно и излишне сложно. Пока нам хватит идеи, что хаос – предельный случай беспорядка.

Итак, в реальном мире есть две крайности: порядок и хаос. Порядок: чёткая, подчиняющаяся определённому порядку смена событий в окружающем нас пространстве и во времени – движение планет, вращение Земли, появление кометы Галлея на горизонте, размеренный стук маятника, поезда, идущие по расписанию. Это с одной стороны. А с другой: хаотическое метание шарика в рулетке, броуновское движение частицы под случайными ударами «соседей», беспорядочные вихри турбулентности, образующиеся при течении жидкости с достаточно большой скоростью, поезда, идущие, когда хотят и куда хотят.

А что между крайностями? А между крайностями – детерминированный хаос, т.е. хаос всё же как-то упорядоченный. Хотя бы местами и временами.

Примерами подобных систем являются атмосфера, турбулентные потоки, некоторые виды аритмий сердца, биологические популяции, общество, как система коммуникаций и его подсистемы: экономические, политические и другие социальные системы, частично кристаллические полимеры и др. Важно, что поведение такой системы кажется случайным, хотя оно определяется детерминированными законами.

Детерминированный хаос – абстрактное математическое понятие, обозначающее детерминированный процесс в детерминированной нелинейной системе, обусловленный

свойством данной системы проявлять неустойчивость, чувствительную зависимость динамики системы от малых возмущений.

Принцип детерминизма гласит: если мы знаем текущее состояние какой-либо системы в природе, мы можем применить наше знание законов природы для предсказания будущего поведения этой системы. Пример: классическая ньютоновская «механическая» Вселенная, в которой положение планет походит на движение стрелок многострелочных часов. Здесь будущее предсказывается однозначно. Однако, в природе есть системы, полностью детерминистические в

ньютоновском смысле, но их будущее принципиально нельзя рассчитать. Это явление известно как детерминистический хаос, или теория хаоса.

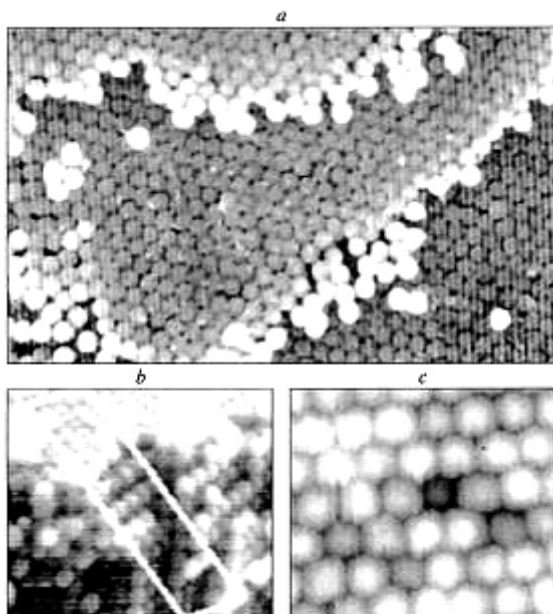


Рис. 14. Примеры детерминированного хаоса (частично упорядоченные структуры).

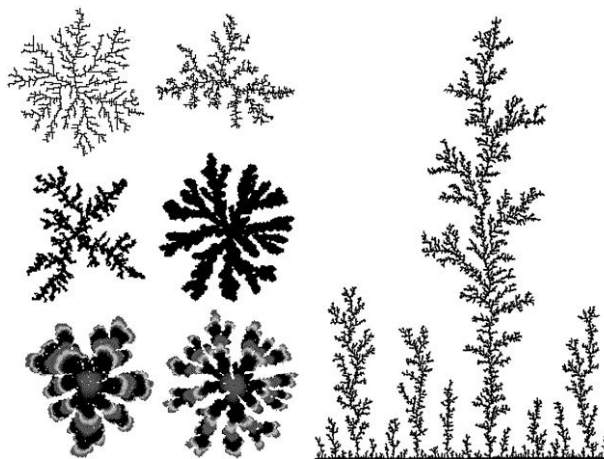
Пример детерминистического хаоса – вода горных потоков. Если бросить в эту речку два листика, один за другим, то ниже по течению они, вероятнее всего, окажутся далеко друг от друга. В системе, подобной этой, небольшое различие в начальных условиях приводит к большому расхождению на выходе. Можем мы предсказать результат бильярдной игры? Нет! Даже задача с бильярдным шаром, отскакивающим от бортов на совершенно ровном столе, растворяется в неопределенности вследствие неточностей в измерении угла, под которым шар приближается к борту в самом начале.

Тем не менее, степень упорядоченности хаоса довольно часто можно рассчитать. Меру даёт геометрия фракталов.

Ею мы и займёмся в следующей части.

При создании единых наук и формировании картины научного мироздания, без понятий порядок, хаос и упорядоченный хаос нам обойтись не удастся.

ГЕОМЕТРИЯ ФРАКТАЛОВ



*Nomen est numen =
назвать – значит понять.*

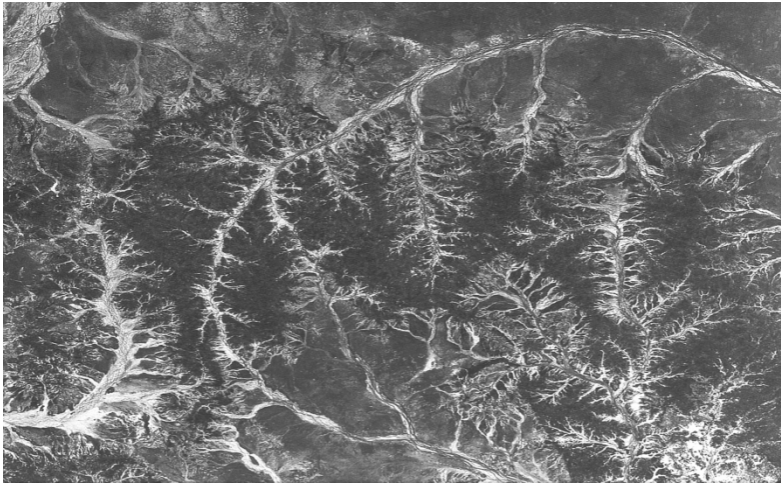
При рассмотрении идеи объединения разных наук возникает проблема отбора тех наук и научных направлений, которые перспективны с точки зрения дальнейшего развития миропонимания. Посмотрите на историю наук. Сколько раз, казалось бы, перспективные, популярные и полезные науки, возникали и бесследно исчезали? Довольно часто. К примеру, теплород, флогистон, эфир; витализм, диалектический материализм, кибернетика, где они? Были, да сплыли...

Вот теперь появилась четвертая (после Эвклида, Римана и Лобачевского) фрактальная геометрия. Модная и наглядная. Так и тянет её куда-нибудь применить. Пока она не исчезла, как мираж.

Очень лестно попытаться применить фракталы для единения наук. Математическая физика претендовала на эту роль, но не потянула. Кибернетика подорвалась. Сейчас на это претендует теоретическая информатика (её иногда отождествляют с компьютерной наукой, что мы категорически отвергаем: термин компьютерная наука – это тот же флогистон, т.е. красивое слово, за которым ничего не стоит (*ребята, создайте сначала нормальный компьютер, а не то убожество, что есть сейчас, тогда и теории предлагать будете*) ибо теоретическая информатика вообще ни о каких компьютерах не вспоминает). Ну, вот и фракталы подоспели. Попробуем, может, что и получится.

Так что такое геометрия фракталов и чем она занимательна?

Фрактал (*fractus – дроблённый, сломанный, разбитый*) – геометрическая фигура, обладающая свойством самоподобия, т.е. составленная из нескольких частей, каждая из которых подобна всей фигуре целиком. Фракталом называется предмет, обладающий, по крайней мере, одним из свойств: 1. Обладает нетривиальной структурой на всех масштабах. В этом отличие от регулярных фигур (таких, как окружность, эллипс, куб, график гладкой функции): если мы рассмотрим небольшой фрагмент регулярной фигуры в очень крупном масштабе, то он будет похож на фрагмент прямой. Для фрактала увеличение масштаба не ведёт к упрощению структуры, т.е. на всех шкалах мы увидим одинаково сложную картину. 2. Является самоподобным или приближённо самоподобным. 3. Обладает дробной метрической размерностью или метрической размерностью, превосходящей топологическую.



ведёт к упрощению структуры, т.е. на всех шкалах мы увидим одинаково сложную картину. 2. Является самоподобным или приближённо самоподобным. 3. Обладает дробной метрической размерностью или метрической размерностью, превосходящей топологическую.

Рис. 15. Речная система.

Фрактальная геометрия – это, прежде всего, геометрия природы. По крайней мере, так её понимал автор термина Б. Мандельброт. Она позволила

находить порядок в формах, на первый взгляд кажущихся совершенно неупорядоченными. В некоторых видах хаоса (правда, весьма специфических) действуют законы упорядоченности, так что можно попытаться дать математическое описание элементов детерминированного (частично упорядоченного) хаоса.

Многие объекты в природе обладают свойствами фрактала: например, побережья, облака, кроны деревьев, снежинки, кровеносная система, система альвеол человека или животных, компьютерная сеть, движение цен на фондовом рынке и многое другое. В отличие от геометрий Эвклида, Римана и Лобачевского фрактальная геометрия своим объектом исследования выбрала что-то неровное, изломанное и шершавое. Но именно это нас и окружает.

Шершавого и неровного вокруг нас много, но далеко не все хаотичное описывается геометрией фракталов. Много, много в природе объектов, которые никакой известной геометрией не описываются, так что в будущем есть шанс создать ещё много геометрий.

А что касается фрактальной геометрии, то, чтобы какой-то объект исследования мог как-то её интерпретироваться, он должен быть самоподобен. А если нет – то нет.

Самоподобный объект – объект, в точности или приближённо совпадающий с частью себя самого (то есть целое имеет ту же форму, что и одна или более частей).

Действительно, многие структуры обладают фундаментальным свойством геометрической регулярности, известной как инвариантность по отношению к масштабу, или «самоподобие». Если рассматривать эти объекты в различном масштабе, то постоянно обнаруживаются одни и те же фундаментальные элементы. Эти повторяющиеся закономерности определяют дробную, или фрактальную, размерность структуры.

Увы! Истинно самоподобных форм в природе не так уж много. Даже с приближённо совпадающими частями. Прежде, чем к чему-то (информатике, компьютеру, дендриту и т.п.) применить геометрию, нужно долго и нужно доказывать, что объект самоподобен. Ко многим типам хаоса даже теория вложенных фракталов не подходит.

Автору не везёт – за какой бы физический объект он не брался (а он выбирал те формы, которые считаются фрактальными), доказать с точностью 95%, что они фрактальны не удалось ни разу! Но какие наши годы? В следующий раз получится...

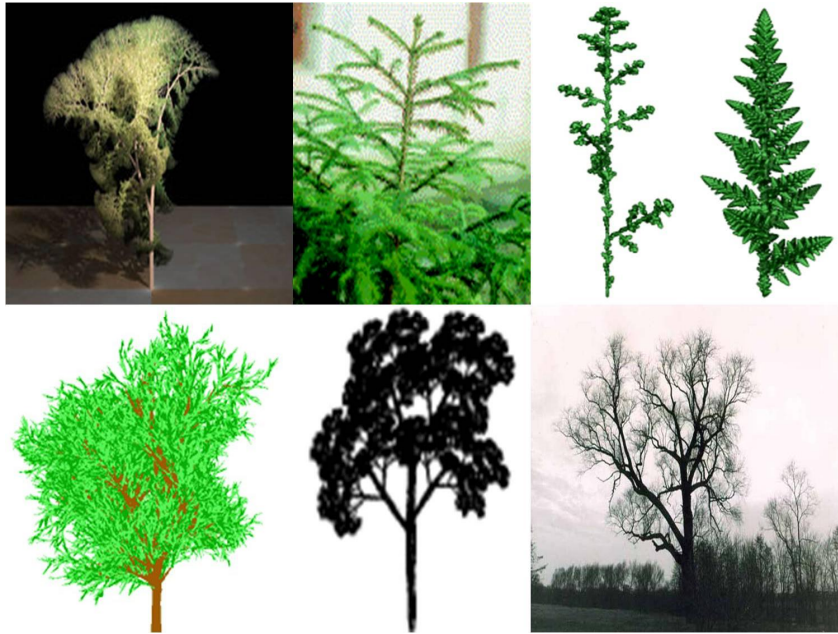


Рис. 16. Фрактальные деревья.

Что такое единение наук? Это – частный случай составления из отдельных частей единого целого. Поскольку фракталы дают чрезвычайно компактный способ описания объектов и процессов, в том числе довольно хаотичных, то естественно наше стремление использовать эту геометрию для объединения хотя бы таких наук, как информатика, термодинамика, математическая физика и материаловедение. А может и ещё что под руку попадётся. Тоже объединим.

Давайте обсудим это в разделе сайта ГЕОМЕТРИЯ ФРАКТАЛОВ.



Рис. 17. Компьютер рисует картины по алгоритмам фрактальной геометрии

Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова
Химический факультет

Междисциплинарный университет Бекмана

Профессор, д.х.н.
И.Н. Бекман

ИНФОРМАЦИЯ, ИНФОРМАТИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Курс лекций

Москва, 2015

Аннотация

Информация, информатика и информационные технологии – конспект курсов лекций "Информатика" и "Компьютерные науки", прочитанных профессором И.Н. Бекманом на химическом факультете Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. В учебном пособии изложены современные взгляды на информацию во всех её основных видах (термодинамическая, техническая и смысловая), обсуждены её свойства, способы передачи и хранения, основные компоненты информатики, как науки и многочисленные сферы приложений информационных технологий. Серьёзное внимание уделено использованию компьютеров для обработки данных и поиску информации в сети Интернет. Обсуждены возможности применения вероятностных подходов в сфере переработки информационных потоков. Во второй части книги разъяснены некоторые особенности компьютеров и техники программирования, необходимые для понимания работы современных информационных систем. Рассмотрены такие темы, как вычислительная техника, вычислительные машины, кодирование информации, информация в компьютере, логические основы компьютеров, алгоритмы, языки программирования, операционные системы, программное обеспечение и графические редакторы.

Содержание полного курса лекций

1. Предисловие
2. Информация
3. Классическая термодинамика
4. Термодинамическая энтропия
5. Статистическая энтропия
6. Техническая информация и энтропия в историческом контексте
7. Техническая информация
8. Энтропия и информация
9. Информационные парадоксы
10. Теория информации
11. Передача информации
12. Кодирование информации
13. Смысловая информация и способы обращения с ней
14. Информация в Интернете
15. Информация в микро и макром мире
16. Информация в биологических системах и в обществе
17. Информация, хаос и фракталы
18. Информация в компьютере (алгоритмы, языки программирования, операционные системы, программное обеспечение, графические редакторы, базы данных, базы знаний, системы автоматизированных проектных работ, Autocad).
19. Искусственный интеллект
20. Информационный бизнес
21. Защита информации
22. Заключение.

Оглавление

Предисловие	3
Лекция 1. ИНФОРМАЦИЯ И НАУКИ О НЕЙ.....	6
1. Науки об информации.....	6
2. Информационные технологии.....	6
3. Компьютерные науки и технологии.....	7
4. Кибернетика	8
5. Информатика как наука.....	10
6. История информатики.....	12
7. Знание.....	18
8. Теоретическая и прикладная информатика	19
9. Структура информационной технологии.....	22
10. Информационные системы.....	22
Лекция 2. ИНФОРМАЦИЯ	25
1. Определение понятия информация	25
2. Характеристики информации	33
2.1 Свойства информации.....	34
2.2 Виды информации.....	35
2.3 Качество информации.....	36
2.4 Количество информации.....	36
2.5 Ценность информации	38
2.6 Информационные процессы.....	40

Предисловие

Информация, наряду с веществом, энергией, пространством-временем, – важнейший компонент нашего мироздания. Информация – нематериальная составляющая материального мира, чем и любопытна эта философская категория. Информация обеспечивает и сведения об объектах и явлениях как внутренней, так и окружающей среды, их параметрах, свойствах и состоянии, которые уменьшают имеющуюся о них степень неопределенности, неполноты знаний о физическом, химическом или биологическом явлении.

Поэтому не удивительно, что для анализа информации была создана новая наука – информатика, а для управления ею – информационная технология.

В настоящее время информатика, как сверхтекущий флюид, проникла во все сферы жизни и деятельности, как отдельного человека, так и общества в целом. При этом надо понимать, что наука информатика в первую очередь занимается неживой природой – термодинамикой физико-химических процессов, космическими явлениями, квантовыми состояниями и т.п. Везде, где порядок борется с беспорядком, где царствует энтропия, там всеми процессами правит и её Альтер эго (*Alter ego*) – информация.

В неживой природе информация есть, но информатики нет: информатику космосу навязывает человек. А вот живая природа активно и непосредственно использует информационный обмен. Пчёлы, сообщаящие в улей информацию о местонахождении цветов с нектаром, сойка, благим матом оповещающая лес, что в него вошёл человек, токующий глухарь, гусь, собравший стаю, и обеспечивший благополучный перелёт на несколько тысяч километров – лишь отдельные примеры. Здесь важно, что информатика в дикой природе обходится без каких-либо научных оснований, технологий и компьютеров. Без этой науки обходятся кумушки на завалинке, сплетники, мифотворцы и клеветники. Информация способна распространяться без технических средств, причём весьма интенсивно.

Человечеству природных средств показалось недостаточно и оно само разработало множество способов передачи и хранения информации, накопило значительные информационные ресурсы: книги, учебники, статьи, патенты, диссертации, отчёты, картины, фильмы, патенты, записки очевидцев и т.д. и т.п. Лавинообразный рост информации связан с тем простым фактом, что информационные ресурсы (в отличие от других видов ресурсов – трудовых, энергетических, минеральных и т.д.) тем быстрее растут, чем больше их расходуют.

Информатика – наука, изучающая общие свойства и процессы отражения материи, порядок в материи, её структурированность и отражение в сознании человека, общества.

Тысячи лет своей сравнительно недолгой истории человечество занималось обработкой информации, прекрасно обходясь без определения понятия «информация», без науки Информатики, используя информационную технологию на базе узелков, наскальной росписи, татуировок, канцелярских счётов, письменности и пения. Большое внимание уделялось способам передачи информации: тамтамы, сигнальные огни, голуби, посланники-вестники-гонцы-курьеры, почта, телеграф и т.п. Первое осмысление, первые теоремы и первые теории в Информатике появились после появления радио и азбуки Морзе, когда возникла проблема оптимизации передачи больших объёмов информации и появилась задача передачи информации без искажений. Мощный всплеск развития информатики и информационных технологий начался после изобретения компьютеров и создания сети Интернет.

Компьютеры (слово компьютер произошло от слова вычислять) сначала предназначались для математического моделирования и обработки данных. Затем они оказались полезными для манипулирования с текстовой, графической, визуальной, аудио- и видео- информацией. На базе компьютеров была создана такая мощная информационная система, как Интернет. Система Интернет базируется на компьютерах (хотя и не связана с конкретными носителями, разрушение многих из них не отразится на работе Интернета в целом), но выход в систему не требует от пользователя обязательного использования компьютера. ***Бедуин, пересекающий на верблюде Сахару, выходит в Интернет и уточняет путь по мобильному телефону.*** Тем не менее, современные электронные компьютеры, несмотря на всю свою примитивность, играют в информационных технологиях важную роль.

Успехи по внедрению компьютеров в Информатику оказались настолько велики, что появились учёные-преподаватели, понимающие под Информатикой компьютерные науки и компьютерные технологии. Такой подход напоминает почвоведов, излагающего свой предмет, как науку и технологию применения лопат, вил и граблей в растениеводстве, или врачей, призывающего диагностировать рак по показаниям градусника под мышкой, дворника, который не может убрать двор без лома. Компьютер для информатики, всё равно, что половая тряпка для уборщицы.

В информатике компьютер – важное средство, но не принципиальное: при рассмотрении информационных теорий без него вполне можно обойтись.

В данном курсе лекций при обсуждении информации и информатики мы продолжительное время продержимся без счётных палочек, арифмометров и компьютеров, и

только в заключительной части обратим внимание на компьютеры и посмотрим, как их можно использовать в сфере информационных технологий.

Современная ситуация в науке и обществе складывается так, что важнейшей составляющей образованности человека является свободное владение информационными технологиями, так как деятельность людей всё в большей степени зависит от информированности и способности эффективно использовать информацию. Сегодня квалифицированный специалист любого профиля (как технического, так и гуманитарного) должен уметь находить, обрабатывать и использовать информацию с помощью компьютеров и других вычислительных и телекоммуникационных средств, которые доступны в эпоху его существования. Знания информатики и информационных технологий – необходимые требования профессиональной пригодности в XXI веке.

Некоторые аналитики полагают, что человечество вступило в эру построения информационного общества. Это мнение основано на том, что сейчас:

- большинство работающих (~80%) занято в информационной сфере, т.е. сфере производства информации и информационных услуг;
- обеспечена возможность доступа любому члену общества практически в любой точке территории в приемлемое время к нужной ему информации (за исключением государственной и коммерческой тайны);
- информация - важнейший стратегический ресурс общества и занимает ключевое место в экономике, образовании, культуре.

«Кто владеет информацией – тот владеет миром», – сказал ещё в 18-том веке – Майер Ротшильд, основатель династии банкиров.

Фундаментальность информатике придаёт широкое и глубокое использование математики, формальных методов и средств, общность и фундаментальность её результатов, их универсальная методологическая направленность в производстве знаний. В этом смысле математическая информатика аналогична "наукам на стыке": математической физике, физической химии, медицинской радиохимии и др.

Конечно, сейчас наука информатика развита слабо. Существует потребность в разработке более полных, точных и адекватных способов исследования информационных процессов и систем, с целью выявления их важнейших характеристик, прогноза развития, повышения надежности принимаемых решений. Формулировка законов эволюции информационных систем позволит расширить границы применимости знаний и построить технологии их применения.

В первом приближении можно считать, что информатика состоит из четырех основных частей.

- физическая информация (виды: термодинамическая – в стиле Клаузиуса-Кельвина и статистическая – в стиле Больцмана-Гиббса-Планка-Эйнштейна, равновесная и неравновесная);
- техническая информация (передача информации по линиям связи (например, радио + азбука Морзе); её описание ведётся различными способами: комбинаторным, вероятностным и алгоритмическим; в стиле Фриша-Хартли-Шеннона-фон Неймана-Винера, Колмогорова и др.);
- компьютерная информация (перемещение и хранение информации в компьютере; языки программирования и алгоритмы, компьютерные науки во всём их разнообразии);
- смысловая информация (семантическая информация и дезинформация, СМИ; *"одна баба сказала"*, способы передачи, переработки, хранения и защиты сообщения; базы данных и знаний).

Есть и другие разделы информации (например, квантово-механическая) но рассмотрение их выходит за пределы этого курса. А вот информационными парадоксами мы займёмся детально.

Серьёзное внимание будет уделено многочисленным практическим применениям информационных идей.

Информационные разделы различны по своей идеологии и математическому описанию. Мы их попытаемся объединить в одно целое с помощью энтропии и фрактальной геометрии, т.е. с помощью мер порядка, беспорядка и частично упорядоченного (детерминированного) хаоса.

Наука информатика возникла сравнительно недавно, так что ни её определение, ни цели, ни задачи до сих пор не сформулированы. Часто эту науку путают то с компьютерными науками, то с кибернетикой, то с теорией вычислений. Физики и химики считают её разделом термодинамики, относя её формальное описание к сфере математической физики. Не меньшая путаница царит в определениях информационной и компьютерной технологий.

Мы здесь под информатикой будем понимать науку об общих свойствах информации, закономерностях и методах её поиска и получения, хранения, передачи, переработки, распространения в квантовых системах, во вселенной, в растительном и животном мире, а также



науку о способах её использования для решения задач термодинамики, молекулярной физики и общественного устройства.

В данной лекции мы рассмотрим историю информатики, её структуру и направления развития. Упомянем мы и о применении информационных наук и технологий в различных видах человеческой деятельности.

Лекция 1. ИНФОРМАЦИЯ И НАУКИ О НЕЙ

1. Науки об информации

В настоящее время известно ~500 определений термина «информация», но ни одного – исчерпывающего. Более того, если информацию воспринимать как основную сущность мироздания (наряду с веществом и энергией), а сейчас это модно, то её вообще нельзя определить в каких-либо простых терминах. Ни сейчас, ни в будущем.



Термина «информация» нет, а наука «Информатика» есть. Есть и «Информационные технологии» – часть индустрии, в которой изучается и используется некая субстанция – информация.

Информатика – совокупность дисциплин, изучающих свойства информации, а также способы представления, накопления, обработки и передачи информации.

Определение не точное, но пока для нас достаточное.

Информацию мы определить не можем, информатику – с трудом, зато можем определить информационную технологию. Правда, тоже не без труда.

2. Информационные технологии

Типичный пример путаницы в умах – определение даваемое энциклопедией «Википедия», где компьютерные и информационные технологии оказываются синонимами:

Компьютерные технологии или **Информационные технологии** – обобщённое название технологий, отвечающих за хранение, передачу, обработку, защиту и воспроизведение информации с использованием компьютеров. Невозможно представить себе современные области производства, науки, культуры, спорта и экономики, где не применялись бы компьютеры. Компьютеры помогают человеку в работе, развлечении, образовании и научных исследованиях. Компьютерные технологии - это передний край науки XXI века. (Здесь особенно мило, что технология, оказывается, край науки! Несмотря на свою современную недоразвитость, компьютерные технологии, действительно помогают человеку, но и грабли помогают садоводу. Следует ли отсюда, что садоводство – технология применения граблей?! Или без граблей яблони не плодоносят?).

Между тем, очевидно: есть ли компьютеры, нет ли компьютеров – информатику это не интересует.

Существуют определение информационных технологий, в котором компьютеры упоминаются лишь между прочим, например:

Информационные технологии (ИТ) – широкий класс дисциплин и областей деятельности, относящихся к технологиям управления и обработки данных, в том числе, с применением вычислительной техники. До недавнего времени под информационными технологиями чаще всего понимали компьютерные технологии, поскольку обычно информационные технологии имеют дело с использованием компьютеров и программного обеспечения для хранения, преобразования, защиты, обработки, передачи и получения информации. Сейчас спецов по компьютерной технике и программированию называют ИТ-специалистами.

К этому типу определений можно отнести определение, принятое ЮНЕСКО:

Информационные технологии – комплекс взаимосвязанных, научных, технологических, инженерных дисциплин, изучающих методы эффективной организации труда людей, занятых обработкой и хранением информации; вычислительную технику и методы организации и взаимодействия с людьми и производственным оборудованием, их практические приложения, а также связанные со всем этим социальные, экономические и культурные проблемы. Сами ИТ требуют сложной подготовки, больших первоначальных затрат и

научноёмкой техники. Их введение должно начинаться с создания математического обеспечения, формирования информационных потоков в системах подготовки специалистов. Отрасль информационных технологий занимается созданием, развитием и эксплуатацией информационных систем.

Существуют, наконец, определения информационной технологии, в которых компьютеры не упоминаются вовсе, например

Информационная технология - совокупность конкретных средств, с помощью которых человек выполняет разнообразные операции по обработке информации во всех сферах своей жизни и деятельности. (Причём здесь человек, интересно? А животное, птица, рыба информацию не обрабатывают что ли?! Ещё как!)

Информационная технология – совокупность методов, объединённых в технологическую цепочку, обеспечивающую сбор, хранение, обработку, вывод и распространение информации. Информационные технологии предназначены для снижения трудоёмкости процессов использования информационных ресурсов.

Именно так мы и будем понимать информационную технологию в данном курсе лекций. В этом смысле информационная технология – просто прикладная информатика.

Если отвлечься от живой природы и сосредоточиться исключительно на паразитирующем на ней элементе – человеке, то информационная технология включает в себя такие компоненты, как информатика, компьютерные технологии, Интернет и Всемирная паутина, Веб-разработки, управление знанием, добыча и хранение данных, базы данных, информационная архитектура, линии связи, информационная безопасность, криптография, искусственный интеллект и др. Можно выделить такие направления, как теоретическая информатика, кибернетика, программирование, информационные системы, вычислительная техника, информатика в обществе, информатика в природе, информация в науке (в первую очередь - в термодинамике), технике и медицине.

Перечислим некоторые реализации информационных технологий, используя традиционные сокращения.

АСУ – автоматизированные системы управления – комплекс технических и программных средств, которые во взаимодействии с человеком организуют управление объектами в производстве или общественной сфере. АСУТП – автоматизированные системы управления технологическими процессами. Например, такая система управляет работой станка с числовым программным управлением (ЧПУ), процессом запуска космического аппарата и т.д.

АСНИ – автоматизированная система научных исследований – программно-аппаратный комплекс, в котором научные приборы сопряжены с компьютером, вводят в него данные измерений автоматически, а компьютер производит обработку этих данных и представление их в наиболее удобной для исследователя форме.

АОС – автоматизированная обучающая система. Есть системы, помогающие учащимся осваивать новый материал, производящие контроль знаний, помогающие преподавателям готовить учебные материалы и т.д.

САПР-система автоматизированного проектирования – программно-аппаратный комплекс, который во взаимодействии с человеком (конструктором, инженером-проектировщиком, архитектором и т.д.) позволяет максимально эффективно проектировать механизмы, здания, узлы сложных агрегатов и др.

Упомянем также диагностические системы в медицине, системы организации продажи билетов, системы ведения бухгалтерско-финансовой деятельности, системы обеспечения редакционно-издательской деятельности – спектр применения информационных технологий чрезвычайно широк.

В настоящее время информационные технологии развиваются в направлении создания нейронных сетей и специальных методов эволюционных вычислений на основе более мелких «неинтеллектуальных» элементов, т.е. систем, по мере возможности (весьма ограниченной!), копирующих биологические системы.

3. Компьютерные науки и технологии

Словом «компьютер» сегодня обозначают электронные вычислительные машины. (Далеко не все современные вычислительные машины, используют в своей работе электроны, например, известны компьютеры, работающие на элементах струйной автоматики, где рабочее вещество – газ; накопилось уже много типов безэлектронных вычислительных машин, причём число их быстро растёт и не исключено, что в будущем слово «электронные» вообще выпадет из определения вычислительных машин). Компьютеры – прежде всего вычислители, и задача компьютерной науки – повышение эффективности расчётов. Конечно, компьютеры используют информацию, но она для них – не главное, главное – аппаратура, языки и алгоритмы (а обмен

информацией можно провести и без компьютеров, теми же мобильниками, к примеру, не говоря уж о передаче мысли на расстоянии).



Различие с информационными технологиями понятно из перечисления компонентов компьютерных наук: программное обеспечение и его структура, алгоритмы, операционные системы и их функции, данные, файлы и вычислительные программы, файловая система, интерфейс пользователя, графический и текстовый редакторы, электронные таблицы, системы управления базами данными, локальные и глобальные компьютерные сети и др.

В настоящее время, по эффективности переработки информации, электронно-вычислительные машины кардинально уступают биологическим системам (до уровня освоения информации муравьём, компьютеру ещё пахать и пахать), но, возможно, внедрение в широкую практику квантовых компьютеров изменит эту ситуацию к лучшему (конечно, если идею квантового компьютера кому-то когда-то удастся реализовать).

Компьютеров не было, а информатика была, теперь компьютеры из информатики вытесняются, а информатика продолжает расцветать. Очевидно, что развитие науки и техники ведёт к переходу информационных технологий на технику, не требующую использования вычислительных машин, по крайней мере, в их современном виде.

4. Кибернетика

Довольно долго (особенно в России) под информационными технологиями понимали кибернетику, так что даже историю развития информатики излагали как историю кибернетики. Теперь, однако, информационная технология и кибернетика размежевались окончательно.

Кибернетика (от греч. *Κυβερνήτης* – «кормчий», «искусство управления», – «правляю рулём, управляю») – наука об общих закономерностях процессов управления и передачи информации в машинах, живых организмах и обществе.

В теории информации термин кибернетика впервые был предложен Норбертом Винером в 50-х годах, который определял её как «науку о связи и управлении в машине и организме». С. Бир назвал её наукой эффективной организации, а Г. Пак расширил определение, включив потоки информации «во все медиа», начиная с Галактик и заканчивая мозгом.

Замечание. Слово "кибернетика" сначала упоминалось в контексте «исследования самоуправления» Платоном в «Законах», для обозначения управления людьми. Слово «*cybernétique*» применялось почти в современном значении в 1830 французским физиком, систематизатором наук Андре Ампером (1775–1836), для обозначения науки управления в его системе классификации человеческого знания.

Кибернетика включает изучение обратной связи, чёрных ящиков, и производных концептов, таких как управление и коммуникация в живых организмах, машинах и организациях, включая самоорганизации. Она фокусирует внимание на том, как что-либо (цифровое, механическое или биологическое) обрабатывает информацию, реагирует на неё и изменяется или может быть изменено, для того чтобы лучше выполнять первые две задачи. Философское определение кибернетики описывает кибернетику как «искусство обеспечения эффективности действия». Кибернетика соединяет системы управления, теории электрических цепей, машиностроения, логического моделирования, эволюционной биологии, неврологии, антропологии, и психологии, теорию игр, теорию систем, психологию (особенно такие её разделы, как нейропсихология и познавательная психология), философию, и архитектуру. Интересно, что

термин информация в определениях кибернетики вообще никак не участвует, хотя, конечно, информация в кибернетике присутствует.

Кибернетика – междисциплинарные исследования структуры регулирующих систем.

Кибернетика близко связана с теорией управления и теорией систем. Она применима к физическим, биологическим и социальным системам. Кибернетика полезна, когда система вовлечена в замкнутую цепь сигнала, где действие системы вызывает некоторое изменение в окружающей среде, а это изменение проявляется на системе через информацию/обратную связь, что вызывает изменения в поведении системы. Эти «круговые причинные» отношения необходимы и достаточны с точки зрения кибернетики. ки.

Согласно современному определению, кибернетика – наука об управлении, связи и переработки информации. Основной объект исследования – кибернетическая система, рассматриваемая абстрактно, вне зависимости от её материальной сущности. Примеры кибернетических систем – автоматические регуляторы в технике, компьютеры, человеческий мозг, биологические популяции, человеческое общество. Каждая такая система представляет собой множество взаимосвязанных объектов, способных воспринимать, запоминать и перерабатывать информацию, а также обмениваться ею. Теоретическое ядро кибернетики составляют теория информации, теория алгоритмов, теория информации, исследование операций, теория оптимального управления, теория распознавания образов. Кибернетика разрабатывает общие принципы создания систем управления и систем для автоматизации умственного труда. Основные технические средства для решения задач управления – компьютеры. Поэтому возникновение кибернетики как науки связано с созданием в 40-х гг. 20 в этих машин, а её развитие в теоретических и практических аспектах – с прогрессом вычислительной техники.

Обратная связь в кибернетике, теории управления, радиотехнике – это процесс, приводящий к тому, что результат функционирования какой-либо системы влияет на параметры, от которых зависит функционирование этой системы. Здесь на вход системы подаётся сигнал, пропорциональный её выходному сигналу (или являющийся функцией этого сигнала). Часто это делается преднамеренно, чтобы повлиять на динамику функционирования системы. Обратные связи применяются в самых различных областях, включая электронику, экономику, биологию и т. п. Различают положительную и отрицательную обратную связь. Отрицательная обратная связь изменяет входной сигнал таким образом, чтобы противодействовать изменению выходного сигнала. Это делает систему более устойчивой к случайному изменению параметров. Положительная обратная связь, наоборот, усиливает изменение выходного сигнала. Системы с сильной положительной обратной связью проявляют тенденцию к неустойчивости, в них могут возникать незатухающие колебания, т.е. система становится генератором.

Чёрный ящик– термин, используемый для обозначения системы, механизм работы которой очень сложен, неизвестен или неважен в рамках данной задачи. Такие системы имеют «вход» для ввода информации и «выход» для отображения результатов работы. Состояние выходов обычно функционально зависит от состояния входов. Если механизм работы неважен, то зависимость результатов от входных данных известна; концепция чёрного ящика при этом используется, чтобы не отвлекаться на внутреннее устройство. Однако такой подход может дать ошибку при использовании устройства на пределе его возможностей. Важно, что если два "чёрных ящика" взаимодействуют между собой, то делают они это только путем обмена информацией.

Теория управления – наука о принципах и методах управления различными системами, процессами и объектами.

Кибернетика – прикладная информатика в области создания и использования автоматических систем управления разной степени сложности, от управления отдельным объектом (станком, промышленной установкой, автомобилем и т. п.) до управления целыми отраслями промышленности, банковскими системами, системами связи и даже сообществами людей. Кибернетика установила, что управление присуще только системным объектам, главное в которых торых антиэнтропийность, т.е. направленность на упорядочение системы.

Процесс управления можно разделить на несколько этапов: сбор и обработка информации; анализ, систематизация, синтез; постановка на этой основе целей; выбор метода управления, прогноз; внедрение выбранного метода управления; оценка эффективности выбранного метода управления (обратная связь). Конечной целью теории управления является универсализация, а значит согласованность, оптимизация и наибольшая эффективность функционирования систем.

В системно-кибернетическом подходе информация рассматривается в контексте трёх фундаментальных аспектов: информационном, связанном с реализацией в системе совокупности процессов отражения внешнего мира и внутренней среды системы путём сбора, накопления и переработки сигналов; управленческом, учитывающем процессы функционирования системы, направления её движения под влиянием полученной информации и степень достижения своих целей; организационном, характеризующем устройство системы управления в терминах её

надежности, живучести, полноты реализуемых функций, совершенства структуры и эффективности затрат на осуществление процессов управления в системе.

Наряду с идеей об универсальности схем управления в кибернетике развиваются и другие идеи: идея универсальной символики, идея логического исчисления, идея измерения информации через понятия вероятностной и статистической (термодинамической) теорий. В состав технической кибернетики входит теория *автоматического управления*, которая стала теоретическим фундаментом автоматике. Ведущее место в кибернетике занимает *распознавание образов*. Основная задача этой дисциплины – поиск решающих правил, с помощью которых можно было бы классифицировать многочисленные явления реальности, соотносить их с некоторыми эталонными классами. *Распознавание образов* – это пограничная область между кибернетикой и *искусственным интеллектом*, ибо поиск решающих правил чаще всего осуществляется путём обучения, а обучение – интеллектуальная процедура.

Ещё одно научное направление связывает кибернетику с биологией. Аналогии между живыми и неживыми системами многие столетия волнуют учёных. Насколько принципы работы живых систем могут быть использованы в искусственных объектах? Ответ на этот вопрос ищет *бионика* – пограничная наука между кибернетикой и биологией. В свою очередь, *нейрокибернетика* пытается применить кибернетические модели в изучении структуры и действия нервных тканей. Недавно в кибернетике возникла – *гомеостатика*, изучающая равновесные состояния сложных взаимодействующих систем различного типа: биологические, социальные, автоматические системы и др. Наконец, *математическая лингвистика* занимается исследованием особенностей естественных языков, а также грамматик, позволяющих формализовать синтаксис и семантику таких языков. Это направление актуально в связи с развитием систем машинного перевода текстов с одних языков на другие.

5. Информатика как наука

Термин «информатика», пожалуй, ещё чаще путают с «компьютерной наукой», чем термин «информационная технология» с «компьютерной технологией».

Началось это с момента возникновения термина *информатика*.

Термин "**информатика**" (франц. *informatique*) происходит от французских слов *information* (информация) и *automatique* (автоматика) и дословно означает "информационная автоматика".

Поскольку в момент начала широкого распространения автоматике её связывали с компьютерами (хотя автоматика часто обходится без компьютеров), то говоря «автоматика» подразумевали «компьютеры, отсюда не далеко до понимания, что информатика и компьютерная наука – синонимы, что, конечно, не так.

Согласно французскому подходу информатика = информация + автоматика. В США и англоязычных странах информатику называют computer science – компьютерная наука. В СССР в 60-е годы все вопросы по разработке, функционированию и применению автоматических систем обработки информации назывались термином "кибернетика".

В 1978 международный научный конгресс официально закрепил за понятием "информатика" области, связанные с разработкой, созданием, использованием и материально-техническим обслуживанием систем обработки информации, включая компьютеры и их программное обеспечение, а также организационные, коммерческие, административные и социально-политические аспекты компьютеризации – массового внедрения компьютерной техники во все области жизни людей.

Энциклопедия «Википедия» даёт такое определение информатики:

Информатика (нем. *Informatik*, фр. *Informatique*, англ. *computer science* – компьютерная наука – в США, англ. *computing science* – вычислительная наука – в Великобритании) – наука о способах получения, накоплении, хранении, преобразовании, передаче и использовании информации. Она включает дисциплины, так или иначе относящиеся к обработке информации в вычислительных и вычислительных сетях: как абстрактные, вроде анализа алгоритмов, так и конкретные, например, разработка языков программирования.

Согласно такому подходу информатика базируется на компьютерной технике и немыслима без нее, с чем мы, в принципе, не согласны.

Термин «информатика» предложен Карлом Штейнбухом в 1957. В 1962 этот термин был введён во французский язык Ф. Дрейфусом. Отдельной наукой информатика была признана в 1970-х; до того она развивалась в составе математики и электроники. Сейчас информатика обладает собственными методами и терминологией. Высшей наградой за заслуги в области информатики является премия Тьюринга.

Если информатику изобразить в виде множества, то это множество будет перекрываться с такими множествами, как естественные, общественные, математические, технические и гуманитарные науки.

Генетически информатика связана с вычислительной техникой, компьютерными системами и сетями, так как именно компьютеры позволяют порождать, хранить и автоматически перерабатывать информацию в больших количествах (*хотя до уровня годовалого ребёнка или там вороны, в плане эффективности переработки и использования информации, компьютеру как до луны: хорошо, если лет через 300 ему удастся догнать какое-либо живое существо*). Как наука, информатика изучает общие закономерности, свойственные информационным процессам. При разработке новых носителей информации, каналов связи, приёмов кодирования, визуального отображения информации и т.п., конкретная природа информации не имеет значения. Здесь важны общие принципы организации и эффективность поиска данных, а не то, какие конкретно данные будут заложены в базу пользователями. Эти общие закономерности есть предмет информатики как науки. Многообразные информационные технологии, функционирующие в разных видах человеческой деятельности (управлении производственным процессом, проектировании, финансовых операциях, образовании и т.п.), имея общие черты, в то же время существенно различаются между собой. Объединить их в одном подходе и призвана информатика (*это вовсе не означает, что ей это удастся*).

Предметную область информатики установить так и не удалось. Для иллюстрации царящего здесь произвола приведём несколько определений информатики, заимствованных из различных источников. в.

Для иллюстрации современной неопределённости с термином информатики приведём некоторые определения.

Информатика, это:

- название фундаментальной естественной науки, изучающей общие свойства информации, процессы, методы и средства её обработки (сбор, хранение, преобразование, перемещение, выдача);

- наука о преобразовании информации, которая базируется на вычислительной технике. Состав информатики: технические средства, программные и алгоритмические;

- комплексная научная и технологическая дисциплина, которая изучает аспекты разработки, проектирования, создания машинных систем обработки данных, а также их воздействия на жизнь общества;

- наука о проблемах обработки различных видов информации, создании новых видов высокоэффективных ЭВМ, позволяющая представлять человеку широкий спектр информационных ресурсов;

- наука об осуществляемой с помощью автоматических средств целесообразной обработке информации, рассматриваемой как представление знаний и сообщений в технических, экономических и социальных;

- наука, техника и применение машинной обработки, хранения и передачи информации;

- отрасль науки, изучающая структуру и общие свойства научной информации, а также вопросы, связанные с её сбором, хранением, поиском, переработкой, преобразованием, распространением и использованием в различных сферах деятельности.

Выбирайте, что нравится!

Информатика – научная дисциплина с широким диапазоном применения. Её основные направления: разработка вычислительных систем и программного обеспечения; теория информации, изучающая процессы, связанные с передачей, приёмом, преобразованием и хранением информации; методы искусственного интеллекта, позволяющие создавать программы для решения задач, требующих определённых интеллектуальных усилий при выполнении их человеком (логический вывод, обучение, понимание речи, визуальное восприятие, игры и др.); системный анализ, заключающийся в анализе назначения проектируемой системы и в установлении требований, которым она должна отвечать; машинная графика, анимация, средства мультимедиа; средства телекоммуникации, в том числе, глобальные компьютерные сети, объединяющие всё человечество в единое информационное сообщество; разнообразные приложения, охватывающие производство, науку, образование, медицину, торговлю, сельское хозяйство и все другие виды хозяйственной и общественной деятельности.

Информатика не более наука о компьютерах, чем астрономия – наука о телескопах».
(С этим высказыванием я полностью согласен).

В данном курсе лекций термин информатика определяется следующим образом:

Информатика – совокупность научных направлений, изучающих информацию, информационные процессы в природе, обществе, технике, формализацию и моделирование, методы познания, способы представления, накопления, обработки и передачи информации.

Теоретическую основу информатики образует группа фундаментальных наук, которую в равной степени можно отнести как к математике, так и к кибернетике: теория информации,

теория алгоритмов, математическая логика, теория формальных языков и грамматик, комбинаторный анализ, теория вероятности и статистика и т. д. Кроме них информатика включает такие разделы, как архитектура компьютеров, операционные системы, теория баз данных, технология программирования и многие другие.

Важным разделом информатики является теоретическая информатика, использующая методы математики для построения и изучения моделей обработки, передачи и накопления информации. В ней есть такие разделы, как математическая логика, теория алгоритмов, исчисление высказываний, теория параллельных вычислений, теория автоматов, теория сетей Петри, верификация, Булева логика, средства логического программирования и представления знаний, вычислительная математика и вычислительная геометрия, теория кодирования, системный анализ, теория систем (динамических, информационных), структурный анализ, системное проектирование, теория принятия решений, теория игр, математическое программирование, исследование операций и др. и др.

Неопределённость в определении сущности информатики, её целей и задач, связана с неопределённостью её предмета – информации. Феномен информации оказался настолько неоднозначным, что понимание его считается одной из сложнейших проблем современности. Уже сами попытки подобраться к понятию информации, различные его трактовки в трудах ученых и практиков заставляют задуматься о необычной роли информации в жизни развивающихся систем.

6. История информатики

Историю развития человеком информационных инструментов можно разделить на три этапа:

1. 5 тыс. лет до н.э. – изобретение письменности;
2. 15 век н.э. – книгопечатанье;
3. Середина 20 века – изобретение компьютера и создание на базе компьютеров информационных сетей.

Понятие информации рассматривалось ещё античными философами. До начала промышленной революции, определение сути информации оставалось прерогативой философов. С развитием электроники, рассматривать вопросы теории информации стала кибернетика. В начале 21-го века возникли специалисты по информатике.

Хотя термин «информация» никогда не был точно определён, сама информация существовала всегда подобно веществу, энергии, пространству и времени. Биота с момента своего возникновения переносит и перерабатывает информацию, носителем которой является ДНК. Эффективным носителем информации является мозг человека, в форме его памяти. Эта память ненадёжна, поэтому достаточно давно человечество придумало записывать мысли во всех видах и на различных носителях. Примерами техногенными носителей являются бумага, *USB-Flash* память, глиняная табличка и т.п. Информация тоже бывает разная: текст, звук, видео, запах, вкус...

Исторические эпохи, с точки зрения освоения идей информатики, следует характеризовать по таким параметрам, как организация передачи информации в пространстве, т.е. распространение информации между удалёнными людьми в относительно небольшой временной интервал; организация передачи информации во времени, т.е. накопление и хранение информации; и организация обработки информации, т.е. преобразование её с целью использования в практических целях – управление, образование, создание новой информации (наука)

Все эти показатели развивались очень неравномерно, что привело к возникновению, а затем и преодолению информационных барьеров, образующихся в результате противоречий между информационными запросами общества и техническими возможностями их обеспечения.

Их три:

1. V тысячелетие до нашей эры. Противоречие из-за необходимости сохранения и передачи накопленного опыта и знания, при отсутствии инструментов для этого. После создания письменности носителями информации стали камни, глиняные таблички, папирус, пергамент, а во II веке до н.э. появилась бумага. Теперь хранилищем информации стал не только человеческий мозг.

2. XV век – развитие производства (появление цехов, мануфактур и т.п.) – как следствие потребность в большом числе образованных людей, способных всем этим управлять. Рукописных книг стало не достаточно. Было изобретено книгопечатание (XV век Гуттенберг). Основным носителем информации – бумага. Скорость передачи её = скорости передачи бумажного носителя. Затем – к началу XX века изменилась ситуация со СКОРОСТЬЮ распространения информации – сначала почта, потом телеграф, телефон, 1905-радио, в 30 гг. 20-го века – телевидение. Появились и устройства для ХРАНЕНИЯ информации – фотография, кинолента, магнитная запись. Не

изменилась только ПЕРЕРАБОТКА информации – по-прежнему эту функцию выполнял только человек.

3. Середина XX столетия. Общие объёмы информации настолько возросли, что человеческий мозг не был в силах с ними справиться. Ещё толчок – II мировая война. И был изобретен компьютер. Его основная роль – хранитель информации, самой информацией по-прежнему занимается человек, ибо искусственный разум создать не удалось.

История носителей информации началась давно.

Первыми носителями информации были стены пещер и поверхности скал. Наскальные изображения и петроглифы (палеолит 40 - 10 тыс. лет до нашей эры) изображали животных, охоту и бытовые сцены. Неизвестно предназначались ли они для передачи информации, служили простым украшением, совмещали эти функции или нужны были для чего-то ещё. Носителями информации выступали глиняные таблички – (7-й век до нашей эры) на базе которых была устроена первая библиотека, восковые таблички, папирус, пергамент, бумага, береста, и др. Перфокарты появились в 1804 (задание рисунка ткани для ткацкого станка), хотя запатентованы лишь в 1884. Впервые применены Г.Холлеритом для переписи населения США в 1890. Перфолента появилась в 1846 и использовалась при посылке телеграммы. С 1952 магнитная лента используется для хранения, записи и считывания информации в компьютере. Она получила огромное признание и распространённость в форме компакт-кассет. Магнитный диск был изобретён в компании IBM в начале 50-х годов. Первый гибкий диск представлен в 1969, жёсткий диск – в 1956, *Compact Disk, DVD* - в конце 20-го века, *Flash* – в начале 21-го века.

В XX в. бурное развитие получили всевозможные средства связи (телефон, телеграф, радио), назначение которых заключалось в передаче сообщений. Однако эксплуатация их выдвинула ряд проблем: как обеспечить надёжность связи при наличии помех, какой способ кодирования сообщения применять в том, или ином случае, как закодировать сообщение, чтобы при минимальной его длине обеспечить передачу смысла с определенной степенью надёжности. Эти проблемы требовали разработки теории передачи сообщений, иными словами, теории информации. Одним из основных вопросов этой теории был вопрос о возможности измерения количества информации.

Попытки количественного измерения информации предпринимались неоднократно. Первые предложения об общих способах измерения количества информации были сделаны Р.Фишером (1921) в процессе решения вопросов математической статистики. Проблемами хранения информации, передачи её по каналам связи и задачами определения количества информации занимались Р.Хартли (1928) и Х. Найквист (1924). Р.Хартли заложил основы теории информации, определив меру количества информации для некоторых задач.

Р. Хартли в своей работе «Передача информации» ввёл в теорию передачи информации методологию измерения количества информации и предложил математический аппарат для расчёта этого количества. При этом под информацией он понимал «... *группу физических символов – слов, точек, тире и т.п., имеющих по общему соглашению известный смысл для корреспондирующих сторон*». Таким образом, Хартли попытался ввести какую-то меру для измерения кодированной информации, а точнее последовательности символов, используемых для кодирования вторичной информации. Ещё в 1927 Хартли отмечал, что количество информации, заключённой в любом сообщении, тесно связано с количеством возможностей, данным сообщением исключающихся. Фраза «яблоки красные» несёт намного больше информации, чем фразы «фрукты красные» или «яблоки цветные», так как первая фраза исключает все фрукты, кроме яблок, и все цвета, кроме красного. Исключение других возможностей повышает информационное содержание.

Наиболее убедительно эти вопросы были разработаны и обобщены американским инженером Клодом Шенноном в 1948, опиравшимся на математический аппарат Хартли. В 1949 Шеннон и Уивер представили формулу вычисления количества информации, в которой информация возрастала с уменьшением вероятности отдельного сообщения. В их представлении информация определяется как мера свободы чьего-либо (или какой-либо системы) выбора в выделении сообщения. После публикации этой работы началось интенсивное развитие теории информации и углубленное исследование вопроса об измерении её количества (*не любой информации, а только кодированной!*). Шеннон также предложил абстрактную схему связи, состоящую из пяти элементов (источника информации, передатчика, линии связи, приёмника и адресата), и сформулировал теоремы о пропускной способности, помехоустойчивости, кодировании и т.д.

В результате развития теории информации, идеи Шеннона быстро распространились на самые различные области знаний. Было замечено, что формула Шеннона очень похожа на формулу энтропии, выведенную Больцманом. В этой связи напомним, что впервые понятие энтропии было введено Клаузиусом в 1865 как функция термодинамического состояния системы. Им же дана эмпирическая формула, связывающая энтропию с теплотой и работой. Л.Больцман (1872) методами статистической физики установил связь между энтропией и термодинамической вероятностью (знаменитую формулу Больцмана написал не он, а Планк), под которой он понимал

количество перестановок молекул идеального газа, не влияющее на макросостояние системы. Энтропия Больцмана выведена для идеального газа и трактуется как мера беспорядка, мера хаоса системы. Для идеального газа энтропии Больцмана и Клаузиуса тождественны, поэтому и эмпирическая функция Клаузиуса стала объясняться как мера вероятности состояния молекулярной системы.

Классики не связывали энтропию с информацией.

Энтропия - *степень неупорядоченности статистических форм движения молекул.*

Энтропия максимальна при равновероятном распределении параметров движения молекул (направлении, скорости и пространственном положении). Значение энтропии уменьшается, если движение молекул упорядочить. По мере увеличения упорядоченности движения энтропия стремится к нулю (например, когда возможно только одно значение и направление скорости). При составлении какого-либо текста с помощью энтропии можно характеризовать степень неупорядоченности чередования символов. Энтропию, например, можно использовать для анализа текста этой лекции. При составлении какого-либо текста с помощью энтропии можно характеризовать степень неупорядоченности чередования символов.

Используя различие формул количества информации Шеннона и энтропии Больцмана (формулы различались только знаками), Л. Бриллюэн охарактеризовал информацию как отрицательную энтропию, или *негэнтропию*. Так как энтропия является мерой неупорядоченности, то информация может быть определена как **мера упорядоченности материальных систем**. В связи с тем, что внешний вид формул совпадает, можно предположить, что понятие информация ничего не добавляет к понятию энтропии. Однако это не так. Если понятие энтропии применялось ранее только для систем, стремящихся к термодинамическому равновесию, т.е. к максимальному беспорядку в движении её составляющих, к увеличению энтропии, то понятие информации применимо к системам, которые не увеличивают энтропию, а наоборот, находясь в состоянии с небольшими значениями энтропии, стремятся к её дальнейшему уменьшению.

Замечание. *В настоящее время известно четыре основных типа энтропий. В термодинамике – это функция состояния (Клаузиус) и мера беспорядка (Больцман). В теории информации – мера достоверности информации, передаваемой по каналу связи (Шеннон). При этом следует понимать, что энтропия Больцмана является мерой беспорядка, хаотичности, однородности молекулярных систем, тогда как энтропия Клаузиуса пропорциональна количеству связанной энергии, находящейся в системе, которую нельзя превратить в работу, а энтропия Шеннона количественно характеризует достоверность передаваемого сигнала и используется для расчёта количества кодированной информации. Четвёртый тип энтропии – е-энтропия Колмогорова (и К-энтропия Колмогорова-Синяя), используется для анализа таких объектов, как географическая карта.*

Теория информации «переросла» рамки поставленных первоначально перед ней задач. Её начали применять к более широкому кругу явлений. Увеличение количества информации стали связывать с повышением сложности системы, с её прогрессивным развитием. Так, по данным некоторых исследований, при переходе от атомного уровня к молекулярному, количество информации увеличивается в 10^3 раза. Количество информации, относящейся к организму человека, примерно в 10^{11} раз больше информации, содержащейся в одноклеточном организме.

Теория информации основана на вероятностных, статистических закономерностях явлений. Она даёт полезный, но не универсальный аппарат. Поэтому множество ситуаций не укладываются в информационную модель Шеннона. Не всегда представляется возможным заранее установить перечень всех состояний системы и вычислить их вероятности. Кроме того, в теории информации рассматривается только формальная сторона сообщения, в то время как смысл его остается в стороне.

В 1948 вышла знаменитая монография Н.Винера «Кибернетика», в которой был провозглашён тезис: **«Информация – это информация, а не материя (вещество) и не энергия»**. Объединяющим началом для всех видов управления в живой и неживой природе Винер считал информацию, существующую в двух видах. Он же ввёл понятие «бит», характеризующее единицу информации.

Н. Винер определил информацию как обозначение содержания, полученного из внешнего мира в процессе приспособления к нему наших чувств. Вводя понятие о семантически значимой информации, он отметил количественное и качественное отличие ЭВМ от человека: машины могут правильно работать в том случае, если получают от человека необходимую им информацию и в самой точной форме. Следовательно, характер информации, вводимой в машину, должен быть точно определён и заранее известен человеку. А живые организмы получают необходимую им информацию благодаря постоянному взаимодействию с природой. Возникновение способности перерабатывать информацию в живых организмах есть исторически развивающийся процесс. Винер показал, что сущность информации заключается в способности систем с памятью к саморазвитию, т.е. процессами развития управляет не только внешнее воздействие, но и память.

По своей сути память о прошлом представляет собой информацию, записанную в определенных структурах, которые могут передаваться, запоминаться, воспроизводиться.

В рассуждениях Винера познание – это часть жизни, более того – самая её суть. *«Действенно жить – значит жить, располагая правильной информацией»*. При этом процесс познания, накопления информации непрерывен и бесконечен. *«Я никогда не представлял себе логику, знания и всю умственную деятельность как завершённую замкнутую картину. Я мог понять эти явления только как процесс, с помощью которого человек организует свою жизнь таким образом, чтобы она протекала в соответствии с внешней средой. Важна битва за знание, а не победа. За каждой победой, т. е. за всем, что достигает апогея своего, сразу же наступают сумерки богов, в которых само понятие победы растворяется в тот самый момент, когда она достигнута»*.

В середине 50-х годов 20-го века, используя материал статистической теории информации, У.Эшби изложил концепцию необходимого разнообразия, согласно которой под разнообразием следует подразумевать характеристику элементов множества, заключающуюся в их несовпадении. Так, множество, в котором все элементы одинаковы, не имеет «никакого» разнообразия, ибо все его элементы одного типа. Если разнообразие его измерить логарифмически, то получим логарифм единицы (единица означает однотипность элементов множества) – нуль. Множество с таким разнообразием соответствует единичной вероятности выбора элемента, т.е. какой элемент множества не был бы выбран, он будет одного и того же типа. Закон необходимого разнообразия Эшби, так же, как закон Шеннона для процессов связи, – общий для процессов управления. Для управления состоянием кибернетической системы нужен регулятор, ограничивающий разнообразие возмущений, которые могут разрушить систему. При этом регулятор допускает такое их разнообразие, которое необходимо и полезно для системы. Закон необходимого разнообразия – один из основных в кибернетике – науке об управлении. Закон относится к процессам передачи сообщений по каналам связи, причём *«информация не может передаваться в большем количестве, чем это позволяет количество разнообразия»*. Кстати Эшби предостерегал против попыток рассматривать информацию как «материальную или индивидуальную вещь»: *«Всякая попытка трактовать информацию как вещь, которая может содержаться в другой вещи, обычно ведёт к трудным проблемам, которые никогда не должны были бы возникать»*.

Закон необходимого разнообразия – разнообразие управляющей системы должно быть не меньше разнообразия управляемого объекта. На практике это означает, что чем сложнее объект управления, тем сложнее должен быть и орган, который им управляет.

Впитав всевозможные взгляды и концепции, понятие информации доросло до уровня философской категории: если причиной существующего в природе разнообразия является неоднородность в распределении энергии (или вещества) в пространстве и во времени, то информация – мера этой неоднородности. Информация существует постольку, поскольку существуют сами материальные тела и, следовательно, созданные ими неоднородности. Всякая неоднородность несёт с собой какую-то информацию.

С понятием информации в кибернетике не связано свойство её осмысленности в обычном житейском понимании. Информация охватывает как сведения, которыми люди обмениваются между собой, так и сведения, существующие независимо от людей. Например, звёзды существуют независимо от того, имеют люди информацию о них или нет. Существуя объективно, они создают неоднородность в распределении вещества и поэтому являются источниками информации.

В данном случае понятие информации определяется уже на уровне таких изначальных понятий философии, как материя и энергия. Информация независима от нашего сознания. Её объективный характер основан на объективности существования её источника – разнообразия. Для того чтобы построить строгую теорию информации, К.Шеннону пришлось отвлечься от её смысла.

Очень близка к «разнообразностной» трактовке информации идея алгоритмического измерения её количества, выдвинутая в 1965 А.Н.Колмогоровым. Суть её заключается в том, что количество информации определяется как минимальная длина программы, позволяющей преобразовать один объект (множество) в другой (множество). Чем больше различаются два объекта между собой, тем сложнее (длиннее) программа перехода от одного объекта к другому. Длина программы при этом измеряется количеством команд (операций), требуемых для воспроизводства последовательности. Этот подход, в отличие от подхода Шеннона, не базируется на понятии вероятности, что позволяет, например, определить прирост количества информации, содержащейся в результатах расчёта, по сравнению с исходными данными. Вероятностная теория информации на этот вопрос не даёт удовлетворительного ответа.

До сих пор мы рассматривали подходы, связанные с количественным аспектом понятия информации без учёта смысловой стороны информации. Эти подходы позволили привлечь к изучению информации точные математические методы. В результате были созданы всевозможные кибернетические устройства, вычислительные машины и пр. Всё это стало возможным благодаря достижениям теории информации. Человек научился её преобразовывать, кодировать и передавать на огромные расстояния с хорошей точностью.

Классическая теория информации Шеннона, значительно дополненная и обогащенная новыми подходами, всё же не может охватить всего многообразия понятия информации и, в первую очередь, её содержательного аспекта. Теория информации К.Шеннона также не занимается определением ценности информации. Количество информации её интересует лишь с точки зрения возможности передачи данных сообщением оптимальным образом.

В 1968 Урсул указал на то, что информация неоднородна, она обладает качественными характеристиками, и два разных типа информации не могут сравниваться. Каждый уровень природы обладает собственной информацией. При этом «человеческая», или «социальная», информация составляют один тип информации, и в рамках которой выделяются два аспекта: семантический (содержание) и прагматический (ценность).

Попытки оценить не только количественную, но и содержательную сторону информации дали толчок к развитию смысловой теории информации. Исследования в этой области связаны с семиотикой – теорией знаковых систем. Одним из важнейших свойств информации является её неотделимость от носителя: во всех случаях, когда мы сталкиваемся с любыми сообщениями, эти сообщения выражены некоторыми знаками, словами, языками. Семиотика исследует знаки как особый вид носителей информации. При этом знак – условное изображение элемента сообщения, слово – совокупность знаков, имеющих смысловое значение, язык – словарь и правила пользования им. Рассуждая о количестве, содержании и ценности информации, содержащейся в сообщении, исходят из возможностей анализа знаковых структур.

В качестве знаковых систем используются естественные и искусственные языки, в том числе информационные и языки программирования, различные системы сигнализации, логические, математические и химические символы. Они служат средством обмена информацией между высокоорганизованными системами (способными к обучению и самоорганизации). Примером могут быть живые организмы, машины с определенными свойствами.

Рассматривая знаковые системы, выделяют три основных аспекта их изучения: синтактику, семантику и прагматику. *Синтактика* изучает синтаксис знаковых структур, т.е. способы сочетаний знаков, правила образования этих сочетаний и их преобразований безотносительно к их значениям. *Семантика* изучает знаковые системы как средства выражения смысла, определенного содержания, т.е. правила интерпретации знаков и их сочетаний, смысловую сторону языка. *Прагматика* рассматривает соотношение между знаковыми системами и их пользователями, или приёмниками-интерпретаторами сообщений. К ней относится изучение практической полезности знаков, слов и, следовательно, сообщений, т.е. потребительской стороны языка.

Основная идея семантической концепции информации заключается в возможности измерения содержания суждений. Но содержание всегда связано с формой, поэтому синтаксические и семантические свойства информации взаимосвязаны, хотя и различны. Содержание можно измерить через форму, т.е. семантические свойства информации выразить через синтаксические. Поэтому исследования семантики базируются на понятии информации как уменьшении или устранении неопределенности.

Семантическая концепция преодолевает чисто вероятностный подход. Здесь количество информации, содержащейся в суждении по некоторой проблеме, определяется тем, насколько доказательство истинности этого суждения уменьшает энтропию, дезорганизованность системы. При прагматическом подходе устанавливается зависимость между информацией и целью переработки информации. Ценностный подход к информации важен в социальном управлении, где необходима не всякая информация, а лишь та, которая способствует достижению цели, стоящей перед системой. Ценность информации определяется через разность между вероятностями достижения цели до и после получения информации. В соответствии с этим определением информация измеряется всегда положительной величиной, а ценность её может быть и отрицательной.

Первую попытку построения теории семантической информации предприняли Р.Карнап и И.Бар-Хиллел. Они применили идеи и методы символической логики и логической семантики к анализу информационного содержания языка науки. Было предложено определять величину семантической информации посредством логической вероятности, представляющей собой степень подтверждения той или иной гипотезы. При этом количество семантической информации, содержащейся в сообщении, возрастает по мере уменьшения степени подтверждения априорной гипотезы. Если вся гипотеза построена на эмпирических данных, полностью подтверждаемых сообщением, то такое сообщение не приносит получателю никаких новых сведений. Логическая вероятность гипотезы при этом равна единице, а семантическая информация оказывается равной нулю. И, наоборот, по мере уменьшения степени подтверждения гипотезы, или запаса знаний, количество семантической информации, доставляемой сообщением, возрастает. Чем больше логическая вероятность высказывания, тем меньше мера его содержания, т.е. чем больше описаний состояния «разрешает» то или иное высказывание, тем меньше должна быть его семантическая информативность и, наоборот, чем больше описаний состояния им исключается,

тем больше должна быть его информативность. Семантико-информационное содержание высказывания определяется не тем, что содержит данное высказывание, а тем, что оно исключает.

Финский ученый Я.Хинтика распространял основные идеи семантической теории информации на логику высказываний. Для многих ситуаций (наблюдения, измерения, подтверждения гипотезы, научного предсказания, объяснения) он предложил метод определения уменьшения неопределенности, которое, например, претерпевает гипотеза g после получения того или иного эмпирического факта h или вообще изменения информационного содержания высказывания g при получении высказывания h .

Задача – связать понятие прагматической информации с целью, целенаправленным поведением, а также и выдвинуть те или иные количественные меры ценности информации.

Логик Д.Харрах поставил перед собой цель показать, как символическая логика и теория семантической информации могут быть использованы для анализа некоторых аспектов человеческой коммуникации. Он создал «модель того, как разумный получатель оценивает последовательность сообщений на основе определенных семантических и прагматических свойств». Харрах предложил обеспечить получателя «программой обработки сообщений», с помощью которой извлекается из получаемых сообщений «годная к употреблению сумма сообщений». Именно к этому результату переработки сообщений, а не к сообщениям в их первоначальной форме применимы количественные меры информации. Логическая модель коммуникации служит тем языковым каркасом, в рамках которого программа может быть образована и применена.

Коммуникационная деятельность – особый вид общения – деятельность по передаче информации от источника (коммуникатора) к получателю (реципиенту) посредством определенного канала. Между коммуникатором и реципиентом может осуществляться «обратная связь», т. е. процесс, с помощью которого коммуникатор получает информацию о том, в какой мере и с каким качеством реципиент получил информацию.

Появление вычислительных машин в 50-х гг. 20-го века создало до становления информатики необходимую ей аппаратную поддержку, нужную для хранения и переработки информации. Но, конечно, с информацией люди оперировали задолго до появления компьютеров. Начиная с древнего абака, дожившего до наших дней в виде конторских счётов, создавались приспособления для обработки числовой информации. Механические устройства типа арифмометров, счётные электрические клавишные машины, счётно-аналитическая техника и многие другие приборы были нацелены на решение тех же задач, которые затем стали реализовываться в компьютерах.

Кроме числовой информации, в поле зрения специалистов была и символьная информация, например, тексты на естественном языке: от приключенческих повестей до отчетов о проделанной работе, справок из учреждений, писем и т. п. Для хранения и переработки такой информации также создавали различные приспособления и устройства. Простейшим примером может служить стойка с ящиками, в которых хранятся карточки, несущие информацию. Такие каталоги – неперенный атрибут библиотек. Но на карточках можно хранить в систематизированном виде и любую другую информацию, записанную на некотором естественном или специальном языке. Стремление как-то автоматизировать процедуры, связанные с поиском нужной информации в каталоге, привело к появлению приёмов, вошедших в арсенал науки – документалистики, продуктом которой стали ручные и автоматизированные информационно-поисковые системы.

Компьютер в одной системе объединил хранение и обработку как числовой, так и текстовой (символьной) информации. Именно поэтому его появление знаменовало начало новой науки.

Информатика является комплексной, междисциплинарной отраслью научного знания.

Важное направление информатики – изучение информационных процессов, протекающих в биологических системах, и использование накопленных знаний при организации и управлении природными системами. Примером является – биокибернетика. В сферу её интересов входят проблемы, связанные с анализом информационно-управляющих процессов, протекающих в живых организмах, диагностика заболеваний и поиск путей их лечения. Сюда же относятся системы, предназначенные для оценки биологической активности тех или иных химических соединений, без которых уже не может существовать фармакология, а также исследования моделей внутриклеточных процессов, лежащих в основе всего живого.

Вторая наука, входящая в это научное направление, – бионика.

Третья наука – биогеоэкология – нацелена на решение проблем, относящихся к системно-информационным моделям поддержания и сохранения равновесия природных систем и поиска таких воздействий на них, которые стабилизируют разрушающее воздействие человеческой цивилизации на биомассу Земли.

Как наука, информатика изучает общие закономерности, свойственные информационным процессам и именно эти общие закономерности есть предмет информатики как науки. Объектом

приложений информатики являются самые различные науки и области практической деятельности, для которых она стала непрерывным источником самых современных технологий.

Цель информатики состоит в поиске нового знания. Информатика – технология обработки накопленного знания и построения нового знания. Информатика изучает методы анализа знания о методах построения нового знания как своего собственного, так и знания других наук.

7. Знание

*Знание бывает двух видов.
Мы либо знаем предмет сами, либо знаем,
где можно найти о нём сведения.
С.Джонсон*

Предметом информатики является знание.

Знание – форма существования и систематизации результатов познавательной деятельности человека. Выделяют различные виды знания: научное, обыденное (здоровый смысл), интуитивное, религиозное и др. Обыденное знание служит основой ориентации человека в окружающем мире, основой его повседневного поведения и предвидения, но обычно содержит ошибки, противоречия. Научному знанию присущи логическая обоснованность, доказательность, воспроизводимость результатов, проверяемость, стремление к устранению ошибок и преодолению противоречий.

Знание – достоверное, истинное представление о чём-либо, в отличие от вероятностного мнения.

Знание – субъективный образ объективной реальности, то есть адекватное отражение внешнего и внутреннего мира в сознании человека в форме представлений, понятий, суждений, теорий. Знание в широком смысле – совокупность понятий, теоретических построений и представлений. Знание в узком смысле – признак определённого объёма информации, определяющий её статус и отделяющий от всей прочей информации по критерию способности к решению поставленной задачи.

Знание (предмета) – уверенное понимание предмета, умение самостоятельно обращаться с ним, разбираться в нём, а также использовать для достижения намеченных целей.

Знание – совокупность данных (у индивидуума, общества или у системы искусственного интеллекта) о мире, включающих в себя информацию о свойствах объектов, закономерностях процессов и явлений, а также правилах использования этой информации для принятия решений. Правила использования включают систему причинно-следственных связей. Отличие знаний от данных состоит в их активности, т. е. появление в базе новых фактов или установление новых связей – источник изменений в принятии решений.

Знания фиксируются в знаках естественных и искусственных языков. Знание противоположно незнанию, то есть отсутствию проверенной информации о чём-либо.

Знания могут быть научными и вненаучными. Научные знания могут быть эмпирическими (на основе опыта или наблюдения) и теоретическими (на основе анализа абстрактных моделей). Теоретические знания – абстракции, аналогии, схемы, отображающие структуру и природу процессов, протекающих в предметной области. Эти знания объясняют явления и могут использоваться для прогнозирования поведения объектов.

Существуют различные виды вненаучного знания. Паранаучные (пара от греч. – около, при) – знания, включающие учения о феноменах, объяснение которых не является убедительным с точки зрения критериев научности; лженаучные – сознательно эксплуатирующие домыслы и предрассудки; квазинаучные – ищущие себе сторонников и приверженцев, опираясь на методы насилия и принуждения; антинаучные – утопичные и сознательно искажающие представления о действительности; псевдонаучные – спекулирующие на совокупности популярных; обыденно-практические – доставлявшие элементарные сведения о природе и окружающей действительности; личностные – зависящие от способностей субъекта и от особенностей его интеллектуальной познавательной деятельности; «народная наука» – особая форма внерационального знания (дело знахарей, целителей, экстрасенсов, а ранее шаманов, жрецов, старейшин рода).

Выделяют личностные (неявные, скрытые) знания – знания людей и формализованные знания – знания в документах, на компакт дисках, в персональных компьютерах, в Интернете.

Для того чтобы нечто считалось знанием, это нечто должно удовлетворять трём критериям: быть подтверждаемым, истинным и заслуживающим доверия.

Управление знаниями задаёт способ распространения знаний, исследует, как знание соотносится с самим собой и как его можно повторно использовать. Повторное использование означает, что знание находится в состоянии постоянного изменения. Управление знаниями

трактует знание как форму информации, наполненную контекстом, основанную на опыте. Информация – это данные, которые существенны для наблюдателя из-за их значимости для него. Данные могут быть предметом наблюдения, но не обязательно должны быть им. В этом смысле знание состоит из информации, подкрепленной намерением или направлением.

Согласно субъективному подходу, информация – это знания, повышающие уровень осведомлённости и уменьшающие неопределённость знаний об окружающей нас действительности, а согласно кибернетическому подходу, информация – содержание последовательностей символов (сигналов) из некоторого алфавита.

Научному знанию присуща логическая обоснованность, доказательность, воспроизводимость познавательных результатов. Опытные знания получают в результате применения эмпирических методов познания – наблюдения, измерения, эксперимента. Это знания о видимых взаимосвязях между отдельными событиями и фактами в предметной области. Оно даёт качественные и количественные характеристики объектов и явлений. Эмпирические законы часто носят вероятностный характер и не являются строгими. Теоретические представления возникают на основе обобщения эмпирических данных. В то же время они влияют на обогащение и изменение эмпирических знаний. Теоретический уровень научного знания предполагает установление законов, дающих возможность идеализированного восприятия, описания и объяснения ситуаций, т. е. познания сущности явлений. Теоретические законы имеют более строгий, формальный характер, по сравнению с эмпирическими. Термины описания теоретического знания относятся к абстрактным объектам, которые невозможно подвергнуть непосредственной экспериментальной проверке. Формализованные знания объективизируются знаковыми средствами языка.

Для экспертных оценок процесса появления новых знаний используют объём знания, накопленного в библиотеках. К сожалению, пока не удаётся измерить темпы производства знания, поскольку нет адекватных универсальных моделей.

Производство знаний из эмпирических данных – одна из основных проблем интеллектуального анализа данных. Существуют различные подходы к решению этой проблемы, в том числе – на основе нейросетевой технологии.

***Искусственные нейронные сети** – математические модели, а также их программные или аппаратные реализации, построенные по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей – сетей нервных клеток живого организма. Это понятие возникло при изучении процессов, протекающих в мозге при мышлении, и при попытке смоделировать эти процессы. Затем эти модели стали использовать в практических целях, как правило, в задачах прогнозирования.*

8. Теоретическая и прикладная информатика

Теория информации базируется на методах теории вероятности, математической статистики, линейной алгебры и других разделах математики. Теория информации широко используется для анализа процессов в различных информационных системах, т.е. системах, основой функционирования которых является процесс преобразования информации (системы связи, телевидения, вычислительные системы и т.д.). В компьютерной технике методы теории информации применяются для оценки быстродействия, точности и надежности систем, сжатия и защиты информации, согласования сигналов и каналов в компьютерных сетях передачи данных и т.д.

Теоретическая информатика – математическая дисциплина, использующая методы математики для построения и изучения моделей обработки, передачи и использования информации.

***Теория информации** (математическая теория связи) – раздел прикладной математики, определяющий понятие информации, её свойства и устанавливающий предельные соотношения для систем передачи данных. Как и любая математическая теория, оперирует с математическими моделями, а не с реальными физическими объектами (источниками и каналами связи). Использует математический аппарат теории вероятностей и математической статистики. Основные разделы теории информации – кодирование источника (сжимающее кодирование) и канальное (помехоустойчивое) кодирование. Теория информации тесно связана с криптографией и другими смежными дисциплинами.*

Отцом теории информации» считается Клод Шеннон. Его теория изначально понималась, как строго математическая задача в статистике и дала инженерам средство передачи информации, в частности путь к определению ёмкости коммуникационного канала в терминах количества бит. Эта теория не занимается значением передаваемого сообщения, но у неё есть дополняющая часть,

которая обращает внимание на содержимое через сжатие с потерями субъекта сообщения, используя критерий точности.

Теория информации – фундамент, на котором строится всё здание информатики. По своей природе информация тяготеет к дискретному представлению. Множество информационных сообщений можно описывать в виде дискретного множества, т.е. по своему характеру теоретическая информатика близка к дискретной математике. Поэтому многие модели теоретической информатики заимствованы из дискретной математики, но наполнены конкретным содержанием, связанным со спецификой информации.

Теоретическая информатика распадается на ряд самостоятельных дисциплин. По степени близости решаемых задач их можно условно разделить на несколько классов.

К первому классу относятся дисциплины, опирающиеся на математическую логику. В них разрабатываются методы, позволяющие использовать достижения логики для анализа процессов переработки информации с помощью компьютеров (теория алгоритмов, теория параллельных вычислений), а также методы, с помощью которых можно на основе моделей логического типа изучать процессы, протекающие в самом компьютере во время вычислений (теория автоматов, теория сетей Петри).

Компьютеры оперируют с числами, т. е. с информацией, представленной в дискретной форме. А сами процедуры, реализуемые компьютером, есть алгоритмы, описанные в виде программ. Чтобы составить программу, необходимо разработать специальные приёмы решения задач. В результате развития устройств, автоматизирующих вычисления, появились современные компьютеры, что стимулировало развитие в математике специальных методов решения задач. Так возникли дисциплины, лежащие на границе между дискретной математикой и теоретической информатикой, например, вычислительная математика и вычислительная геометрия.

Теория информации занимается изучением информации как таковой (т. е. в виде абстрактного объекта, лишённого конкретного содержания), выявлением общих свойств информации, законов, управляющих её рождением, развитием и уничтожением. Сюда же относится теория кодирования, в задачу которой входит разработка форм, в которые может быть «отлито» содержание любой конкретной информационной единицы (передаваемого сообщения, гранулы знаний и т. п.). В теории информации имеется раздел, специально занимающийся теоретическими вопросами передачи информации по различным каналам связи.

При информационном процессе передача и приём информации осуществляется по цепи: источник ® канал связи ® приёмник ® передача ® приём; обработка информации - по цепи: преобразование информации по определённым правилам ® приём ® анализ ® использование. Хранение информации может осуществляться в памяти человека (внутренняя память, мозг - носитель информации) или на внешних носителях (внешняя память - записные книжки, книги, флешки и т.п.).

Информатика имеет дело с реальными и абстрактными объектами. Информация, циркулируя в реальном виде, овеществляется в различных физических процессах, но в информатике она выступает как некоторая абстракция. Такой переход вызывает необходимость использования в компьютерах специальных абстрактных (формализованных) моделей той физической среды, в которой «живёт» информация в реальном мире, т.е. вместо реальных объектов в компьютерах используются их модели.

Теоретическая информатика включает ряд математических разделов. Она опирается на математическую логику и использует теорию алгоритмов и автоматов, теорию информации и кодирования, теорию формальных языков и грамматик, исследование операций и другие. Этот раздел информатики использует математические методы для общего изучения процессов обработки информации.

По своей природе информация дискретна и представляется обычно в символично-цифровом виде в текстах и точечном виде на рисунках. С учётом этого в информатике широко используется *математическая логика*, как раздел дискретной математики.

Системный анализ изучает структуру реальных объектов и даёт способы их формализованного описания через информационные модели. Он занимает пограничное положение между теоретической информатикой и кибернетикой.

Имитационное моделирование – один из важнейших методов компьютерного моделирования, в котором воспроизводятся процессы и явления, протекающие в реальных объектах, используются специальные приёмы воспроизведения процессов, протекающих в реальных объектах, в тех моделях этих объектов, которые реализуются в вычислительных машинах.

Теория массового обслуживания изучает широкий класс моделей передачи и переработки информации – системы массового обслуживания.

Теория принятия решений изучает общие схемы выбора нужного решения из множества альтернативных возможностей. Такой выбор часто происходит в условиях конфликта или противоборства. Эти модели изучаются в теории игр. Необходимо среди всех возможных решений выбрать наилучшее или близкое к такому. Проблемы, возникающие при решении этой задачи,

изучаются в дисциплине, получившей название математическое программирование (речь не идёт о программировании для компьютеров).

При организации поведения, ведущего к нужной цели, принимать решения приходится многократно. Поэтому выбор отдельных решений должен подчиняться единому плану. Изучением способов построения таких планов и их использованием для достижения поставленных целей занимается ещё одна научная дисциплина - исследование операций, в которой изучаются и способы организации различного рода процессов, ведущих к получению нужных результатов. Если решения принимаются не единолично, а в коллективе, то возникает немало специфических ситуаций: образование партий, коалиций, появление соглашений и компромиссов. Эти проблемы изучаются в теории игр и теории коллективного поведения.

Вычислительная математика разрабатывает методы решения задач на компьютерах с использованием алгоритмов и программ.

Теория кодирования и передачи информации изучает информацию в виде абстрактного объекта, лишённого конкретного содержания. Здесь исследуются общие свойства информации и законы, управляющие её рождением, развитием и уничтожением.

Вычислительная техника – раздел, в котором разрабатываются общие принципы построения вычислительных систем. Речь идёт не о технических деталях и электронных схемах, а о принципиальных решениях на уровне архитектуры вычислительных систем, определяющей состав, назначение, функциональные возможности и принципы взаимодействия устройств. Примеры решений в этой области – неймановская архитектура компьютеров первых поколений, шинная архитектура ЭВМ старших поколений, архитектура параллельной (многопроцессорной) обработки информации.

Программирование – деятельность, связанная с разработкой систем программного обеспечения. Его основные разделы: системное программное и прикладное программирование. Среди системного программирования – разработка новых языков программирования, создание интерфейсных систем (пример – Windows). Среди прикладного программного обеспечения общего назначения самые популярные – система обработки текстов, электронные таблицы, системы управления базами данных. Среди прикладного программного обеспечения общего назначения самые популярные: система обработки текстов, электронные таблицы, системы управления базами данных. В каждой области предметных приложений информатики существует множество специализированных прикладных программ более узкого назначения.

Информационные системы связаны с анализом потоков информации в различных сложных системах, их оптимизации, структурировании, принципах хранения и поиска информации. Информационно-справочные и информационно-поисковые системы, гигантские современные глобальные системы хранения и поиска информации (например, Интернет) вовлекают всё больший круг пользователей. Без теоретического обоснования принципиальных решений в океане информации трудно ориентироваться.

Искусственный интеллект – область информатики, в которой решаются сложнейшие проблемы, находящиеся на пересечении с психологией, физиологией, лингвистикой и другими науками. Поскольку, как мыслит человек, никто не знает, то исследования по искусственному интеллекту не привели к решению принципиальных проблем. Заставить мыслить компьютер не удалось, но попытки продолжаются. Основные направления разработок – моделирование рассуждений, компьютерная лингвистика, машинный перевод, создание экспертных систем, распознавание образов и другие. От успехов работ в области искусственного интеллекта зависит решение такой важнейшей прикладной проблемы как создание интеллектуальных интерфейсных систем взаимодействия человека с компьютером, благодаря которым это взаимодействие будет походить на межличностное и станет более эффективным. Искусственный интеллект тесно связан с теоретической информатикой, откуда он заимствовал многие модели и методы, например, использование логических средств для преобразования знаний. Столь же прочны связи этого направления с кибернетикой.

Математическая и прикладная лингвистика, нейрокибернетика и гомеостатика связаны с развитием искусственного интеллекта. Основная цель работ в области искусственного интеллекта – стремление проникнуть в тайны творческой деятельности людей, их способности к овладению знаниями, навыками и умениями. Для этого необходимо раскрыть те глубинные механизмы, с помощью которых человек способен научиться практически любому виду деятельности. И если суть этих механизмов будет разгадана, то есть надежда реализовать их подобие в искусственных системах, т.е. сделать их по-настоящему интеллектуальными. Такая цель исследований в области искусственного интеллекта тесно связывает их с достижениями психологии – науки, одной из задач которой является изучение интеллекта человека.

Когнитивная психология – раздел психологии, изучающий закономерности и механизмы процессов познавательной деятельности человека, которые также важны для специалистов в области искусственного интеллекта. Другое направление психологии – психолингвистика также интересуется специалистами в области искусственного интеллекта. Её результаты касаются моделирования общения не только с помощью естественного языка, но и с

использованием иных средств: жестов, мимики, интонации и т.п. Кроме теоретических исследований активно развиваются и прикладные аспекты искусственного интеллекта. Например, робототехника занимается созданием технических систем, которые способны действовать в реальной среде и частично или полностью заменить человека в некоторых сферах его интеллектуальной и производственной деятельности. Такие системы получили название роботов.

Экспертная система – прикладное направление искусственного интеллекта. Она адаптирована для любого пользователя, позволяет получать не только новые знания, но и профессиональные умения и навыки, связанные с данными знаниями, передаёт не только знания, но и пояснения и разъяснения, т.е. обладает обучающей функцией.

Прикладная информатика занимается применением информационной технологии в различных областях человеческой деятельности: в научных исследованиях (**АСНИ** – автоматизированные системы для научных исследований), в разработке новых изделий (**САПР** – системы автоматизированного проектирования), в информационных системах (**АИС** – автоматизированные информационные системы), в управлении (**АСУ** – автоматические системы управления), в обучении (**АОС** – автоматизированные обучающие системы) и др.

9. Структура информационной технологии

Информационная технология имеет дело с разнообразными отраслями науки, техники и производства, в которых осуществляется переработка информации главным образом с помощью компьютеров и телекоммуникационных средств связи. В первом приближении её можно представить как состоящую из трёх взаимосвязанных частей – технических средств (*hardware*), программных средств (*software*), алгоритмических средств (*brainware*). Информационная технология, как отрасль народного хозяйства, состоит из однородной совокупности предприятий разных форм хозяйствования, где занимаются производством компьютерной техники, программных продуктов и разработкой современной технологии переработки информации. Значение информационной индустрии состоит в том, что от неё зависит рост производительности труда в других отраслях народного хозяйства. При этом производительность труда в самой информатике должна расти высокими темпами, т. к. в современном обществе информация выступает как предмет конечного потребления: людям необходима информация о событиях, происходящих в мире, о предметах и явлениях, относящихся к их профессиональной деятельности, о развитии науки и самого общества. Дальнейший рост производительности труда и уровня благосостояния возможен лишь на основе использования новых интеллектуальных средств и человеко-машинных интерфейсов, ориентированных на приём и обработку больших объёмов мультимедийной информации (текст, графика, видеоизображение, звук, анимация).

Информационная технология создаёт информационное обеспечение процессов управления любыми объектами на базе компьютерных информационных систем. Она определяет, что такое информационные системы, какое место они занимают, какую должны иметь структуру, как функционировать, какие общие закономерности им свойственны. Основные научные направления в информационной технологии: разработка сетевой структуры, компьютерно-интегрированные производства, экономическая и медицинская информатика, информатика социального страхования и окружающей среды, профессиональные информационные системы.

Главная задача теоретических основ информационной технологии заключается в разработке методов и средств преобразования информации и их использовании в организации технологического процесса переработки информации. Сюда входит исследование информационных процессов любой природы; разработка информационной техники и создание новейшей технологии переработки информации на базе полученных результатов исследования информационных процессов; решение научных и инженерных проблем создания, внедрения и обеспечения эффективного использования компьютерной техники и технологии во всех сферах общественной жизни.

10. Информационные системы

Информационная система (или **информационно-вычислительная система**) – совокупность взаимосвязанных аппаратно-программных средств автоматизации поиска, накопления и обработки информации; анализирует потоки информации в различных сложных системах, оптимизирует и структурирует их.

Информационная система (ИС) представляет собой совокупность содержащейся в базах данных информации (сведения/сообщения/данные независимо от формы их представления) и обеспечивающих её обработку информационных технологий (процессы, методы поиска, сбора,

хранения, обработки, предоставления, распространения информации и способы осуществления таких процессов) и технических средств.

В информационную систему данные поступают от источника информации. Эти данные отправляются на хранение либо претерпевают в системе некоторую обработку и затем передаются потребителю. Между потребителем и информационной системой может быть установлена обратная связь. В этом случае информационная система называется замкнутой. Канал обратной связи необходим, когда нужно учесть реакцию потребителя на полученную информацию. Информационная система состоит из баз данных, в которых накапливается информация, источника информации, аппаратной части ИС, программной части ИС, потребителя информации.

Ручные информационные системы характеризуются отсутствием технических средств и выполнением всех операций человеком (желательно – в уме). Автоматические информационные системы выполняют все операции по переработке информации без участия человека. Примером автоматических информационных систем являются поисковые машины Интернет, например *Google*, где сбор информации о сайтах осуществляется автоматически поисковым роботом и человеческий фактор не влияет на ранжирование результатов поиска.

Информационно-поисковая система – система для накопления, обработки, поиска и выдачи интересующей пользователя информации. Информационно-аналитические системы – класс информационных систем, предназначенных для аналитической обработки данных с использованием баз знаний и экспертных систем. Информационно-решающие системы – системы, осуществляющие накопление, обработку и переработку информации с использованием прикладного программного обеспечения: управляющие информационные системы с использованием баз данных и прикладных пакетов программ; экспертные информационные системы, использующие прикладные базы знаний, ситуационные центры (информационно-аналитические комплексы) и т.п.

Информационные системы классифицируют по архитектуре: локальные ИС (работающие на одном электронном устройстве, не взаимодействующем с сервером или другими устройствами); клиент-серверные ИС (работающие в локальной или глобальной сети с единым сервером); распределенные ИС (децентрализованные системы в гетерогенной многосерверной сети).

Информационная система представляет собой взаимосвязанную совокупность средств, методов и персонала, используемых для хранения, обработки и выдачи информации в интересах достижения поставленной цели. Структурно ИС состоит из технического, математического, программного, информационного и организационного обеспечения.

Техническое обеспечение – комплекс технических средств (компьютеры, устройства сбора, накопления, обработки, передачи и вывода информации, устройства передачи данных и линии связи и т.д.) и документация на них и на технологические процессы обработки данных.

Математическое и программное обеспечение – совокупность математических методов, моделей, алгоритмов и программ.

Информационное обеспечение – банк данных, блок расшифровки запросов и блок поиска.

Организационное обеспечение – совокупность методов и средств, регламентирующих взаимодействие пользователей с техническими средствами системы.

Вычислительная техника. Раздел информатики, посвященный вычислительной технике.

По сфере применения информационные системы классифицируются:

- информационные системы организационного управления
- обеспечение автоматизации функций управленческого персонала;
- информационные системы управления техническими процессами
- обеспечение управления механизмами, технологическими режимами на автоматизированном производстве;
- автоматизированные системы научных исследований
- программно-аппаратные комплексы, предназначенные для научных исследований и испытаний;
- информационные системы автоматизированного проектирования
- программно-технические системы, предназначенные для выполнения проектных работ с применением математических методов;
- автоматизированные обучающие системы
- комплексы программно-технических, учебно-методической литературы и электронные учебники, обеспечивающих учебную деятельность;
- интегрированные информационные системы
- обеспечение автоматизации большинства функций предприятия;
- экономическая информационная система
- обеспечение автоматизации сбора, хранения, обработки и выдачи необходимой информации, предназначенной для выполнения функций управления.

Модельные информационные системы позволяют установить диалог с моделью в процессе её исследования (предоставляя при этом недостающую для принятия решения информацию), а также обеспечивает широкий спектр математических, статистических, финансовых и других моделей, использование которых облегчает выработку стратегии и объективную оценку альтернатив решения. Использование экспертных информационных систем связано с обработкой знаний для выработки и оценки возможных альтернатив принятия решения пользователем. Реализуется на двух уровнях: *Первый уровень* (концепция «типового набора альтернатив») – сведение проблемных ситуаций к некоторым однородным классам решений. Экспертная поддержка на этом уровне реализуется созданием информационного фонда хранения и анализа типовых альтернатив. *Второй уровень* – генерация альтернативы на основе правил преобразования и процедур оценки синтезированных альтернатив, используя базу имеющихся в информационном фонде данных. Экспертные системы представляют совокупность фактов, сведений и данных с системой правил логического вывода информации на основании логической модели баз данных и баз знаний. Базы данных содержат совокупность конкретных данных, а базы знаний – совокупность конкретных и обобщенных сведений в рамках логической модели базы знаний.

*_**_*

Таким образом, информатика базируется на следующих основных понятиях: информация и сообщение; алгоритм и алгоритмизация; система и структура; модель и моделирование; исполнитель и его операционная среда; проектирование систем и технология, в частности, информационная, компьютерная технология.

Предметная область науки "информатика" – информационные процессы и системы, модели, языки их описания, технологии их актуализации, направленные как на получение знаний, так и на применение знаний, принятие на их основе решений в различных предметных областях. Эти информационные процессы могут происходить в живых существах, технических устройствах, обществе, в индивидуальном и общественном сознании.

Лекция 2. ИНФОРМАЦИЯ

Информатика, информационные технологии и кибернетика имеют дело с информацией, но что такое информация до сих пор не известно. Для определённости, мы будем понимать под информацией любые сведения и данные, отражающие свойства объектов в природных (биологических и др.), социальных и технических системах и передаваемые звуковым, графическим (в т.ч. письменным) или иным способом без применения или с применением технических средств.

В данной лекции мы приведём ряд определений термина "информация" и покажем, что основными являются три вида информации: физическая (в форме термодинамической и статистической), техническая (кибернетическая, компьютерная или шенноновская) и смысловая (семантическая). Квантовой информацией, энтропией фон Неймана, и энтропией Колмогорова-Синяя мы займёмся позднее. Коротко рассмотрим методы определения количества технической информации, рассмотрим свойства смысловой информации и способы оценки её качества и ценности, и поговорим об информационных законах.

Информация есть информация и ничто другое. И этого достаточно!

Базовым понятием информатики является информация. Любая деятельность человека (*и не только, человека, бродячей собаки, к примеру*) представляет собой процесс сбора и переработки информации, принятия на её основе решений и их выполнения.

Многие (*но не все!*) учёные относят информацию к одной из исходных категорий мироздания наряду с материей, энергией и временем. Эти категории тесно взаимосвязаны между собой. Эти связи можно усмотреть и в природе и процессах, порожденных как отдельным человеком, так и обществом. Пример связи этих категорий в природных явлениях – переход жидкости из твёрдого состояния в жидкое. Здесь есть материальные преобразования, энергетические затраты, а также потеря информации относительно расположения атомов. Примером связи материя-энергия-информация в обществе является образовательный процесс, т.е. информационный процесс, требующий материального и энергетического обеспечения; другим примером является любое управление, например автомобилем. Однако есть существенное отличие информации от вещества и энергии – она может возникать и исчезать.

Прогресс человечества неизбежно влечёт увеличение общего объёма информации, которым оно располагает, причём объём этот растёт гораздо быстрее, чем население земного шара и его материальные потребности. Таким образом, можно утверждать, что значимость информации по отношению к двум другим рассмотренным категориям постепенно возрастает.

1. Определение понятия информация

Понятие «информация» – первичное и неопределяемое понятие (как, например «точка» в геометрии, «множество» в математике).

Первоначально смысл слова «информация» трактовался как нечто присущее только человеческому сознанию и общению – знания, сведения, известия. Затем смысл этого слова начал расширяться и обобщаться. Так, одним из всеобщих свойств материи (наряду с движением, развитием, пространством, временем и др.) было признано отражение, заключающееся в способности адекватно отображать одним реальным объектом другие реальные объекты, а сам факт отражения одного объекта в другом и означает присутствие в нём информации об отражаемом объекте. Если состояния одного объекта находятся в соответствии с состояниями другого объекта (например, соответствие между положением стрелки вольтметра и напряжением на его клеммах или соответствие между нашим ощущением и реальностью), то один объект отражает другой, т. е. содержит информацию о другом. Высшей, специфической формой отражения является сознание человека.

Особенностью понятия «информация» является его универсальность – оно используется во всех без исключения сферах человеческой деятельности: в философии, естественных и гуманитарных науках, в биологии, медицине, в психологии человека и животных, в социологии, искусстве, в технике и экономике, а также в повседневной жизни.

Вплоть до начала XX века слово «информация» не встречалось ни в одном периодическом издании, ни в одном толковом словаре. В России оно появляется лишь в «Толковом словаре русского языка» под редакцией Н. Д. Ушакова, изданном в 1935, и определяется как действие по глаголу «информировать», как осведомление о чём-либо.

В обычном разговорном языке слово «информация» появилось гораздо раньше. Оно пришло из латинского, имело хождение в основном в журналистских кругах и означало процесс

информирования о важнейших событиях (войны, коронации, географические открытия и т. п.) в жизни общества. В этом же значении во времена Петра I оно пришло в русский язык (в основном – в официальный).

Широко в разговорном языке это слово появилось в сороковых годах 20-го века одновременно с перенесением его основного значения с глагольной формы (процесса информирования) на предметную, на содержание передаваемых при таком информировании сведений. В это же время оно всё чаще и чаще появляется в научных публикациях и технических текстах, приобретая статус научного термина, а позже – общенаучной категории. Такая его трансформация связана с социальным развитием и вызванным им техническим прогрессом, который, в свою очередь, это развитие ускорил. Человеческое сообщество, наконец, осознало, что его развитие – это вовлечение в орбиту общественных (в основном – производственных) отношений всё более масштабных технических комплексов, построение и использование которых требует не только огромных материальных и энергетических затрат, но и всё возрастающих объёмов знаний.

Именно синонимом слова «знания» стало слово «информация» в формирующейся науке об информации. Тогда информатика сводилась к инвентаризации, структурированию и упорядочению достижений науки и техники, к созданию условий своевременного о них информирования (в форме библиографий, каталогов, библиотечных картотек, реферативных журналов, справочников и т.п.) заинтересованных в этом социальных субъектов, что обеспечивало быстрый поиск нужных знаний, их доступность в целях эффективного использования в личных и общественных интересах.

Впервые понятие «информация» как научный термин использовал статистик биолог Фриш. Термин информация приводится также в книге Н.Винера «Кибернетика», однако лишь в узком смысле – как «количество информации», причём не любой информации, а кодированной. В настоящее время термин информация используется в быту, на производстве, в науке, образовании, технической литературе и др. При этом, смысл термина «информация» столь широк, что приходится в противоречие с контекстным содержанием. Предпринимались попытки дать фундаментальное, универсальное толкование этого термина, отображающее его мировоззренческий, философский смысл наряду с такими философскими категориями как вещество и энергия. И если два последних понятия отображают материальный мир, то в противовес этому термин «информация» связывается с идеальными, нематериальными субстанциями. Информация – это содержание сообщения, сигнала, памяти, а также сведения, содержащиеся в сообщении, сигнале или памяти.

Хотя многие полагают, что информация наряду с материей и энергией является первичным понятием мира и не может быть определена, существует множество определений термина "информация".

Энциклопедия Википедия выдаёт по этому поводу следующее:

Информация (от лат. *informatio*):

- осведомление, разъяснение, изложение;
- сведения (сообщения, данные) независимо от формы их представления;
- абстрактное понятие, имеющее множество значений, в зависимости от контекста.

Толковый словарь русского языка Ожегова приводит два определения слова «информация»:

– **Информация** – сведения об окружающем мире и протекающих в нём процессах, воспринимаемые человеком или специальным устройством.

(А животные-птицы, рыбы-насекомые, каким специальным устройством воспринимают информацию?!)

– **Информация** – сообщения, осведомляющие о положении дел, о состоянии чего-нибудь. (Научно-техническая и газетная информации, средства массовой информации – печать, радио, телевидение, кино).

(А космические объекты (звёзды, галактики, кометы) тоже обмениваются информацией через средства массовой коммуникации?! А информация, циркулирующая в муравейнике, отражается в местных газетах?!)

– **Информация** – внесённое взаимодействием в структуру одной (отображающей) материальной системы чуждое ей содержание, которое выглядит искажениями её нормальной структуры и характеризует совсем другую (отображаемую) материальную систему.

Информация – результат взаимодействия материальных систем. Она объективно существует в любой материальной системе в форме чуждых для сущности этой системы её структурных особенностей. Содержанием этой информации являются особенности других материальных систем – систем, которые при взаимодействии с первой, её структуру исказили сообразно этим своим особенностям.

Согласно экономическому словарю:

Информация (*informatio* - осведомлять) – 1) любое сообщение о чём-либо; 2) сведения, данные, значения экономических показателей, являющиеся объектами хранения, обработки и передачи и используемые в процессе анализа и выработки экономических решений в управлении;

3) один из видов ресурсов, используемых в экономических процессах, получение которого требует затрат времени и других видов ресурсов, в связи с чем эти затраты следует включать в издержки производства и обращения; 4) одна из трёх фундаментальных субстанций (вещество, энергия, информация), составляющих сущность мироздания и охватывающих любой продукт мыслительной деятельности, прежде всего – знания, образы.

Согласно официальным источникам

По российскому ГОСТу 7.0-99:

Информация – сведения, воспринимаемые человеком и/или специальными устройствами как отражение фактов материального или духовного мира в процессе коммуникации.

По российскому федеральному закону от 27 июля 2006 года № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации» (Статья 2): **Информация** – сведения (сообщения, данные) независимо от формы их представления.

Главный научный центр СССР в области научной информации – ВИНТИ в своё время дал такое определение:

Информация – объективное содержание связи между взаимодействующими материальными объектами, проявляющееся в изменении состояний этих объектов. (Наконец, человек исчез из определения информации).

Разные энциклопедии и словари дают разные определения информации. **Информация** – продукт взаимодействия данных и методов, рассмотренный в контексте этого взаимодействия.

Информация – одно из наиболее общих понятий науки, обозначающее некоторые сведения, совокупность каких-либо данных, знаний и т.п.

Информация – сведения, передаваемые людьми устным, письменным или другим способом (с помощью условных сигналов, технических средств и т. д.); понятие, включающее обмен сведениями между людьми, человеком и автоматом, автоматом и автоматом; обмен сигналами в животном и растительном мире; передачу признаков от клетки к клетке, от организма к организму.

Информация: 1. Сообщение о положении дел где-либо, о состоянии чего-либо. 2. Сведения об окружающем мире и протекающих в нем процессах, воспринимаемые человеком или специальными устройствами. Обмен такими сведениями между людьми и специальными устройствами. Обмен сигналами в животном и растительном мире. 3. То же, что: информирование.

Информация – 1) Сообщение о некотором положении дел, передаваемое людьми. 2) Величина уменьшаемой неопределённости в результате получения сообщения. 3) Управленческие сигналы в единстве их синтаксические, семантические и прагматические характеристики. 4) Мера разнообразия в объектах и процессах и т. д.

Понятие «информация» используется в различных науках, при этом в каждой науке термин «информация» связан с различными системами понятий.

Информация в биологии: Биология изучает живую природу и понятие «информация» связывается с целесообразным поведением живых организмов. В живых организмах информация передаётся и хранится с помощью объектов различной физической природы (состояние ДНК), которые рассматриваются как знаки биологических алфавитов. Генетическая информация передается по наследству и хранится во всех клетках живых организмов.

Философский подход: Информация – взаимодействие, отражение, познание.

Кибернетический подход: Информация – характеристики управляющего сигнала, передаваемого по линии связи. Это та часть знаний, которая используется для ориентирования, активного действия, управления, т.е. в целях сохранения, совершенствования, развития системы (Н. Винер). В теории управления в качестве информации рассматриваются те сообщения, которые система получает из внешнего мира в процессе приспособления. Информация уменьшает общую неопределённость и информационную энтропию; она доступна измерению как мера устранения неопределённости в системе.

Юридический подход: Информация – один из видов объектов гражданских прав, предусмотренных ст.128 ГК РФ. В самом Гражданском кодексе нет определения понятия информации и предусмотрена защита только для более узкого объекта данного вида – служебной и коммерческой тайны. В соответствии с федеральным законом «Об информации, информатизации и защите информации» от 20.02.1995. Информация представляет собой сведения о лицах, предметах, фактах, событиях, явлениях и процессах, независимо от формы их представления.

Известны следующие подходы к определению информации:

– традиционный (обыденный): **Информация** – сведения, знания, сообщения о положении дел, которые человек воспринимает из окружающего мира с помощью органов

чувств (зрения, слуха, вкуса, обоняния, осязания). Здесь информация – сведения о лицах, предметах, фактах, событиях, явлениях и процессах независимо от формы их представления.

– вероятностный: **Информация** – это сведения об объектах и явлениях окружающей среды, их параметрах, свойствах и состоянии, которые уменьшают имеющуюся о них степень неопределённости и неполноты знаний.

– для человека: **Информация** – это знания, которые он получает из различных источников с помощью органов чувств.

В обиходе информацией называют любые данные или сведения, которые кого-либо интересуют. Например, сообщение о каких-либо событиях, о чьей-либо деятельности и т.п. "информировать" в этом смысле означает "сообщить нечто, неизвестное раньше".

В технике под информацией понимают сообщения, передаваемые в форме знаков или сигналов. Применительно **к компьютерной обработке данных** под информацией понимают некоторую последовательность символических обозначений (букв, цифр, закодированных графических образов и звуков и т.п.), несущую смысловую нагрузку и представленную в понятном компьютеру виде. Каждый новый символ в такой последовательности символов увеличивает информационный объём сообщения.

Приведём набор разных определений информации:

Информация – это не вещество и не энергия, это информация (Н. Винер)

Информация – обозначение содержания, полученного из внешнего мира в процессе нашего приспособления к нему и приспособления к нему наших чувств (Н. Винер)

Информация – мера организованности системы, точно также энтропия системы есть мера дезорганизованности системы. (Н. Винер)

Информация – снятая неопределённость наших знаний о чём-то (К. Шеннон)

Информация – мера изменения во времени и пространстве структурного разнообразия систем (К. Шеннон);

Информация – мера изменения во времени и пространстве структурного разнообразия систем (Эшби).

Информация – знания, переданные кем-то другим или приобретенные путём собственного исследования или изучения;

Информация – сведения, содержащиеся в данном сообщении и рассматриваемые как объект передачи, хранения и обработки; сведения, известия, в научно-технических приложениях – то, что имеет на себе сигнал

Информация – нематериальная составляющая материального мира.

Информация – мера сокращения неизвестности;

Информация – мера упорядоченности материи;

Информация – сведения об объектах и явлениях окружающей среды, их параметрах, свойствах и состоянии, которые уменьшают имеющуюся о них степень неопределённости, неполноты знаний (Н.В. Макарова);

Информация – отрицание энтропии (Леон Бриллюэн);

Информация – мера сложности структур (Моль);

Информация – отраженное разнообразие (Урсул);

Информация – связи, установленные между воздействием и реакцией на него;

Информация – содержание процесса отражения (Тузов);

Информация – вероятность выбора (Яглом); **Информация** – то, что изменяет нас (Грегори Бэйтсон);

Информация – суть представления факта (или послания) для получателя (Хорнунг);

Информация – связи, установленные между воздействием и реакцией на него (Дёмин А.И.);

Информация – семантическое отражение бытия в языковой (знаковой) форме, создаваемое и актуализируемое в коммуникациях в виде сообщения, понимаемого в контексте определённой социокультуры. Высшей формой информации является знание – организованная и имеющая ценность информация.

Информация – мера определенности, которую живые объекты или их части вносят во взаимодействия живых объектов, их частей, элементов внешней среды в процессе синтеза живых объектов.

Информация – вербальная конвенциональная категория коллективного знания людей, определяющая определенное свойство взаимодействия явлений природы, определяемых человеком, при котором участники взаимодействия существуют в обстоятельствах определяющих взаимодействие, представленных свидетелями взаимодействия, способных определять причину и следствие взаимодействия и отсюда наделять участников взаимодействия характеристикой источника или приёмника информации (Дёмин А.И.).

Информация – степень изменения знаний субъекта, т.е. известной ему структурированной совокупности сведений, выражаемых через его внутреннюю структуру (С. Расторгуев).

Информация – универсальное свойство материи, представляющее собой распространение в пространстве и времени содержания объектов (явлений) действительности посредством объективно существующих носителей различной природы (И. М. Левкин).

Информация – данные, организованные таким образом, что имеют смысл для имеющего с ними дело человека».

Информация – 1) сведения, сообщение о чем-либо, передаваемое людьми; 2) уменьшаемая, снижаемая неопределенность в результате полученных сведений; 3) передача, отражение разнообразия;

Информация – сведения, воспринимаемые человеком и/или специальными устройствами как отражение фактов материального или духовного мира;

Информация – это понимание (смысл, представление, интерпретация), возникающее в аппарате мышления человека после получения им данных, взаимоувязанное с предшествующими знаниями и понятиями.

Информация – содержание сообщения или сигнала, сведения, рассматриваемые в процессе их передачи или восприятия; одна из исходных общенаучных категорий, отражающая структуру материи и способы её познания, несводимая к другим, более простым понятиям.

Информация – 1) что-то сказанное, новости; знание, полученное любым способом; 2) в информационной теории и теории компьютеров: это точная мера информации, измеренная в битах и охватывающая диапазон от нуля (это когда все известно заранее) и до какого-то максимального значения, когда ничего заранее о содержании сообщения не известно; 3) любые данные, хранящиеся в компьютере»;

Информация – данные или массив данных, упорядоченные определённым образом, вносящие изменения в принимающую систему, и изменяющие её состояние или поведение. Передаётся через носитель. Имеет свойство полного исчезновения.

Информация – всякое сообщение или передача сведений о чем-либо, что заранее не было известно.

Информация означает порядок, коммуникация есть создание порядка из беспорядка или, по крайней мере, увеличение степени той упорядоченности, которая существовала до получения сообщения.

Среди философов популярны дефиниции, содержащие термин «отражение»:

Информация – разнообразие, которое один объект содержит о другом, это взаимное, относительное разнообразие; разнообразие, которое отражающий объект содержит об отраженном;

Информация – отражение в сознании людей объективных причинно-следственных связей в окружающем нас реальном мире;

Информация – содержание процессов отражения; информация не тождественна отражению, а его инвариантная часть, поддающаяся определению, объективированию, передаче.

Информация – философская категория, рассматриваемая наряду с пространством, временем, и материей; информация – сообщение, т.е. форма связи между источником, передающим сообщение и приемником, его принимающим.

Особое место в коллекции определений занимают утверждения о том, что информация – это алгоритм:

Информация – план строения клетки и, следовательно, всего организма. Информация – «инструкция» к самоорганизации в процессе эволюции биологических структур.

Информация – некий алгоритм, т.е. совокупность приёмов, правил, сведений, необходимых для построения оператора. Под словом «оператор» здесь понимается некое стороннее воздействие на систему, изменяющее спонтанный ход событий.

Большое число определений понятия «информация» означает, что общепринятого определения нет. Более того, нет даже чёткого понимания сути этого явления, хотя потребность в нем уже назрела. Сейчас область применимости информационного подхода существенно расширилась. Понятие «информация» используется при исследовании практически всех процессов самоорганизации (в частности биологической эволюции). При этом актуальным становится вопрос о возникновении информации и эволюции её ценности. Здесь без определения понятий уже не обойтись. Выбор определения зависит от аппарата исследования, иными словами, определение должно быть конструктивным, то есть пригодным для использования в рамках аппарата. Тогда

Информация – случайный и запомненный выбор одного варианта из нескольких возможных и равноправных.

Здесь слово «случайный» выделено, поскольку оно относится к способу выбора и потому сужает область применимости определения. Вообще говоря, выбор может быть и не случайным, тогда говорят о рецепции информации. Случайный выбор соответствует генерации (т.е. спонтанному возникновению) информации. Слово «запомненный» относится к фиксации

информации. Выбор может и не запоминаться (забыться). Такой выбор называется микроинформацией. Запомненный выбор (в отличие от незапоминаемого) называется макроинформацией. Во всех информационных процессах используется макроинформация (запоминаемая). Микроинформация используется в физических спекуляциях по поводу «демона Максвелла». Слова «возможных и равноправных» означают, что варианты выбора принадлежат одному множеству и различия между ними не велики. В идеале варианты могут быть полностью равноправны и равновероятны, но могут и отличаться. Тогда слово «равноправные» означает, что априорные вероятности различных выборов – величины одного порядка.

С учётом сказанного примем определение информации в виде:

Информация – запомненный выбор одного варианта из нескольких возможных и равноправных.

Это определение позволяет понять такие тонкие явления как возникновение жизни и механизмы мышления, т.е. построить мост между естественными науками и гуманитарными. Это определение допускает введение меры – количества информации.

Из всего множества определений и толкований термина «информация», можно выделить четыре, вокруг которых объединяются почти все остальные.

1) **Информация** – отраженное многообразие.

2) **Информация** – то, что образуется в аппарате мышления у человека. Это субъективное понятие синонимичное понятию «знание», «значение», «смысл».

3) **Информация** – то, что передается в естественных и искусственных системах и является формой, средством передачи информации, т. е. является средством передачи знания, значения, смысла. В этом случае синонимом термина «информация» является термин «данные».

4) **Информация** – интегрированное понятие, рассматриваемое в системах объект познающий – объект познаваемый, объект управляющий – объект управляемый, объект обучающий – объект обучаемый, то в значении смысл, если речь идёт о смысле познания, управления, обучения, то в значении данные, если речь идёт о средствах передачи этого смысла.

Некоторые учёные отказывают существованию информации, как в мире физической реальности, и так и в мире личностной психологии, но признают её наличие в мире общественного знания, где бытуют художественные образы и научные знания, мифы о прошлом и мечты о будущем.

Существуют шесть основных философских концепций, которые занимаются изучением информации, как научного понятия. Они утверждают:

1. Информация не существует. Она – призрак, ошибочное представление науки, то, чего никто никогда не видел, не ощущал и не фиксировал с помощью какой-либо аппаратуры.

2. Информация существует, но не в нашем физическом мире. Эта доктрина объясняет природу телепатии, вспышек, привидений и т.п. интересных явлений.

3. Существует чистая информация без какой-либо формы разновидности.

4. Информация имеет материальную природу, которая сама по себе очень информативна.

5. Информация первична, а материя – вторична. Информация – основа Мира. Информацион – главный элемент во Вселенной, дающий жизнь субстанции, порождающий вещество, энергию, пространство, время и т.д. Весь мир состоит из информации. В перспективе усвоение информации обеспечит возможность избежать препятствий на верхних границах величин, таких как скорость света, абсолютный нуль, преодоление временных отрезков за мгновения, сила гравитации и т.д. Станет возможным повернуть информационные машины в будущее или в прошлое из нашего физического мира, преодолевать пространство с любой скоростью.

6. Информация – субъективная реальность. В объективном мире существуют разнообразные свойства и отношения между субстанцией и энергией. Часть их воспринимается нашими органами чувств, распознается, и субъективно воспринимается как информация. Информация реально существует только в представлении субъекта, потому что это – субъективная реальность. Понятно, почему одно и то же сообщение воспринимается различными субъектами по-разному или не воспринимается ими вовсе.

Итак, философия определения понятия информация отличается чрезвычайной противоречивостью. На одном полюсе – безграничный панинформизм, т.е. утверждение, что весь мир и все его свойства созданы из информации. На другом – отрицание существования информации как действительности, т.е. информация – субъективная реальность. Между ними – признание информации третьим атрибутом материи, равнозначным веществу и энергии; утверждение о независимости информации от какого бы то ни было материального носителя; трактовка её как структуры с необычными для физического мира свойствами; признание в одном случае первичности информации и вторичности материи, а в другом – материальность информации и т.д.

В данном курсе лекции мы будем рассматривать три информации:

Физическая информация: третий компонент материального мира (наряду с веществом и энергией), управляющий порядком и хаосом в микромире, в космосе, в термодинамике, статистической физике, биосистемах и т. п. Она не предусматривает участие какого-либо Разума в своём осмыслении, в том числе – человеческого. Не было человека на Земле, информация была, не будет его – информация продолжит своё существование. Физическая информация распадается на два подвида: термодинамическую и статистическую. Именно на примере физической информации мы попытаемся установить связь между информацией и энтропией (информация, как отрицательная энтропия).

Смысловая (семантическая) информация – информация, которую воспринимает человек (и которая, к примеру, передаётся средствами массовой информации). Здесь уже человеческий разум (совместно с его глупостью) развернётся во всей красе. Это то, что можно осмыслить, оценить, купить-продать-подарить, накапливать, хранить, охранять, терять; она способна исчезать и появляться, может быть полезной и вредной, истинной и ложной, переходя в дезинформацию. Мы рассмотрим методы её поиска в Интернете, способы создания банка данных и банка знаний.

Техническая информация (она же кибернетическая или компьютерная) – информация, передаваемая азбукой Морзе, по радио- или телеканалу, информация в компьютерах и прочих технических машинах. Мы рассмотрим вопросы передачи информации по линии связи, вопросы кодирования-декодирования информации, и способы переработки информации компьютерами. А истинна эта информация или ложна, ценна или бесполезна, нас интересоваться не будет. Не важно материальна она или нет. Важно сколько раз я должен ударить по телеграфному ключу, чтобы передать азбукой Морзе сообщение жене о полярной зимовке, и насколько разнообразен этот текст (можно вспотеть, сутками передавая одну букву, но информации в этом будет мало). Не менее важно и то, как текст исказится молниями и прочими помехами коротковолновой связи.

Проблемы передачи информации разделяются на три уровня: синтактический (рассматриваются внутренние свойства сообщений), семантический (анализируется смысловое содержание сообщения, его отношение к источнику информации) и прагматический (рассматривается потребительское содержание сообщения, его отношение к получателю).

На **синтактическом уровне** имеют место чисто технические проблемы совершенствования методов передачи сигналов; проблемы доставки получателю сообщений; полная абстракция от смыслового содержания сообщений и их целевого предназначения. Учитывают: тип носителя; способ представления информации; скорость передачи и обработки; размеры кодов представления информации.

На **семантическом уровне** проблемы связаны с формализацией и учётом смысла передаваемой информации; подобные проблемы чрезвычайно сложны, т. к. смысловое содержание информации больше зависит от получателя, чем от семантики сообщения, представленного на каком-либо языке; анализируются сведения, которые отражает информация; выявляется смысл информации и содержание информации; осуществляется обобщение.

На прагматическом уровне проблемы возникают при определении ценности и полезности информации для потребителя; здесь важны последствия от получения и использования данной информации потребителем.

В данном курсе лекций для нас будут существовать три различных сущности, по недоразумению названные одним именем - информацией. В конце курса мы попытаемся их объединить.

В заключение этой части приведём высказывания некоторых учёных об информации и связанных с ней проблемах.

ШЕННОН К. Работы по теории информации и кибернетике. М., 1963. Значение теории информации было, возможно, преувеличено и раздуто до пределов, превышающих её реальные достижения ... Сейчас теория информации, как модный опьяняющий напиток, кружит голову всем вокруг. Сознывая, что теория информации является сильным средством решения проблем теории связи, нельзя забывать, что она не является панацеей для инженера-связиста и тем более для представителей всех других специальностей. Представителям различных наук следует ясно понимать, что основные положения теории информации касаются очень специфического направления исследования, направления, которое совершенно не обязательно должно оказаться плодотворным в психологии, экономике и в других социальных науках. Здание нашего искусственно созданного благополучия легко может рухнуть, как только в один прекрасный день окажется, что при помощи нескольких магических слов, таких как информация, энтропия, избыточность..., нельзя решить всех нерешенных проблем.

БЕРГ А.И., СПИРКИН А.Г. Кибернетика и диалектико-материалистическая философия // Проблемы философии и методологии современного естествознания. М., 1973 Для характеристики реального мира ныне недостаточны фундаментальные понятия классической физики – материя, вещество, движение, энергия, пространство, время. Для полноты этой характеристики необходимо столь же фундаментальное и столь же всеобщее понятие информации. Нет материи без

информации, нет и информации без ее материального носителя - вещества и энергии. Информация представляет собой качественную и количественную характеристику организованности отражения. Вообще информация – это как бы некоторая "сила", направленная против дезорганизации и хаоса; в этом смысле информация неотделима от структурности, организованности материальных систем. БЕРЛЯНТ А. М. Образ пространства: карта и информация. М., 1986. Вероятностно-статистический подход к картографической информации встретил многочисленные возражения. В ряде критических высказываний подчеркивалось, что шенноновская формула энтропии не содержит самого понятия «информация» и не позволяет определить «количество информации» или «информативность» карты. Карта, где знаки располагаются в пространстве, принципиально отличается от других языковых сообщений, использующих последовательности знаков или сигналов.

БИРЮКОВ Б.В. Кибернетика и методология науки. М., 1974. Бесспорна возможность теоретико-информационного изложения ряда физических теорий – изложения, исходящего, конечно, из представления о том, что информация и ее меры суть объективные характеристики физических явлений. В самом деле, если понятия термодинамической энтропии и энтропии информационной столь тесно связаны, то почему не попытаться развить на информационной основе самую термодинамику? Если понятие количества информации столь уверенно интерпретируется в вероятностных терминах, то почему бы не попытаться заложить теорию информации в фундамент статистической физики и квантовой механики? Имеется определенное несоответствие между сильно развитым формальным аппаратом оценки количественной формы информации и недостаточно осмысленной её «содержательной» стороной, что сказывается на приложениях теории (в ряде случаев представления и методы шенноновской теории пытались «механически» применить в новых областях, что приводило к дискретизации самих методов). Информация «многолика», включает в себя синтаксический, семантический и прагматический аспекты. Разные стороны понятия информации отображаются в целом спектре теорий. Эти теории не противоречат, а дополняют друг друга, развивая разные количественные меры, связанные с той или иной стороной феномена информации. При этом всегда имеется в виду задача, если не полного, то частичного синтеза этих теорий.

БРИЛЛЮЭН Л. Наука и теория информации. М., 1960. Новая территория была завоевана для науки с появлением в недавнее время теории информации. Это открытие создало новую область, немедленно привлечшую разведчиков и исследователей. Как это случилось? Как далеко это идёт? И где оно может продолжать распространяться? Означает ли это вторжение науки на территорию, принадлежащую по традиции философии, или это есть открытие новой страны, своего рода «ничейной земли», которая ускользала от прежних исследований?

ВАВИЛОВ С. Физика // Под знаменем марксизма, 1935, № 1. Может случиться так, что будущая физика включит как первичное, простейшее явление «способность сходную с ощущением» и на ее основе будет объяснять многое другое

ВИНЕР Н. Кибернетика, или управление и связь в животном и машине. М., 1958. Понятие количества информации совершенно естественно связывается с классическим понятием статистической механики – понятием энтропии. Как количество информации в системе есть мера организованности системы, точно также энтропия системы есть мера дезорганизованности системы. Информация есть информация, а не материя и не энергия. Тот материализм, который не признает этого, не может быть жизнеспособным в настоящее время. Мозг не выделяет мысль, как печень выделяет желчь, информация – это обозначение содержания (сигналов), полученного из внешнего мира в процессе нашего приспособления к нему и приспособления к нему наших чувств.

ВЯТКИН В.Б. Информация есть форма отражения материи. Прогресс проистекает из паритета двух начал – хаоса и порядка (энтропии и информации). Складывается ощущение, что энтропия и информация есть различные проявления одной и той же сущности, некоторой ауры, которая является атрибутом любых системных образований.

ДОБРУШИН Р. Л. Теория информации (комментарии). В кн.: Колмогоров А. Н. Теория информации и теория алгоритмов. М., 1987. Столь общий многообразный объект как информация, не может допускать единого метода численного измерения, а идеи Шеннона обоснованы лишь в применении к той важной, но всё же ограниченной ситуации, когда рассматриваются оптимальные методы кодирования и декодирования информации в целях ее передачи по каналам связи или ее хранения.

КОЛМОГОРОВ А. Н. Теория информации и теория алгоритмов. М., 1987. Не видно, почему теория информации должна столь существенно основываться на теории вероятностей, как это представляется по большинству руководств. Эта зависимость от заранее созданной теории вероятностей в действительности не является неизбежной. Теория информации должна предшествовать теории вероятностей, а не опираться на нее. Основы теории информации имеют по самому существу этой дисциплины финитный комбинаторный характер.

МАЗУР М. Качественная теория информации. М., 1974. А как применить понятие «количество информации», например к географической карте? Ведь карта содержит самую

различную информацию. О каких вероятностях здесь может идти речь? Ведь каждый элемент карты, как и каждый элемент территории, существует, а не «происходит» с какой-то вероятностью. На заданные вопросы можно ответить, что теория информации создана не для этих потребностей. Однако такой ответ означает признание того факта, что созданная теория до сих пор дает меньше, чем обещает ее название.

НОВИК И. Б. Негэнтропия и количество информации // Вопросы философии, 1962, № 6. Отсутствие в современной теории информации законов сохранения можно рассматривать как свидетельство незавершенности этой теории. Решение вопроса относительно обобщения законов сохранения на область информации, на наш взгляд, существенно продвинет разработку содержательной теории информации, даст опорный стержень для, так сказать, «физики отражения». Нам представляется, что информацию можно трактовать как форму отражения. По нашему мнению, в информации выражается упорядоченность отражения. Если для материи справедливы законы сохранения, то можно полагать, что некоторые аналоги этих законов применимы и к атрибуту отражения. При рассмотрении только одной формы отражения (информации) без учета её перехода в другую форму закон сохранения в данной области не удаётся установить.

НОВИК И. Б. Кибернетика. Философские и социологические проблемы. М., 1963. По-видимому, и в области теории информации мы столкнёмся со специфическими статистическими законами, характеризующими «дуализм» отражения (информация и шум), подобно тому, как специфичность статистики в квантовой механике связана с «дуализмом» микрообъектов (обладание свойствами частицы и волны).

СЕДОВ Е. Одна формула и весь мир (книга об энтропии). М., 1982. Теория информации в том виде, в каком она существует сегодня, – это лишь первый шаг к решению многих научных задач. С её помощью пока не открыты законы такого масштаба, как например, закон всемирного тяготения. Но тут приходится делать скидку на возраст – нельзя же требовать от ребёнка, пусть даже весьма и одарённого, великих свершений с самых первых шагов. Современная наука изучает различные уровни материального мира. И на всех уровнях она обнаруживает нескончаемую диалектическую борьбу энтропии и информации – двух противоположных начал, отражающих вечное стремление к увеличению хаоса и противодействующую ему тенденцию к образованию упорядоченных структур.

УРСУЛ А. Д. Природа информации. М., 1968. Доведенная до крайности концепция выбора, неопределенности может привести к тому, что объективный характер самой информации окажется под сомнением, и будет признаваться «творение» информации субъектом или вообще воспринимающей системой. В силу этих соображений наше общее понимание информации должно быть освобождено от ее зависимости от воспринимающей системы (хотя в ряде случаев эта зависимость действительно существует) в такой же степени, как и от трактовки информации в духе чисто вероятностных представлений.

УРСУЛ А. Д. Проблема информации в современной науке. М., 1975. Понятия информации, которые изолируются от связи с категорией отражения, на наш взгляд, не будут далее развиваться, они образуют тупиковые линии развития. Категория отражения выступает в качестве важнейшего методологического ориентира, помогающего обнаружить верные пути в «хаосе» омонимии понятия информации.

ХАРКЕВИЧ А. А. Очерки общей теории связи. М., 1955. Несмотря на быстрые темпы развития, общая теория связи не получила еще завершения в своих основных построениях. Обращает на себя внимание, в частности, отсутствие до настоящего времени системы основных законов типа законов сохранения, характерных для многих сложившихся отраслей знания. Наличие подобного рода законов, специфичных для связи интуитивно ощущается. Однако эти законы еще не найдены и не сформулированы. **ШАМБАДАЛЬ П. Развитие и приложения понятия энтропии. М., 1967.** Развитие теории информации, и в частности связь этой теории с термодинамикой, происходило в недавнее время, поэтому в будущем вполне могут появиться новые непредугаданные результаты.

2. Характеристики информации

Рассмотрим свойства смысловой информации, в освоении которой предусмотрено участие человека, и которая может казаться ему чем-то полезной или вредной.

Информация и её свойства являются объектом исследования многих научных дисциплин, таких как теория информации (математическая теория систем передачи информационных сообщений), кибернетика (наука о связи и управлении в машинах и животных, а также в обществе и человеке), семиотика (наука о знаках и знаковых системах), теория массовой коммуникации (исследование средств массовой информации и их влияния на общество), информатика (изучение процессов сбора, преобразования, хранения, защиты, поиска и передачи всех видов информации и

средств их автоматизированной обработки), соционика (теория информационного метаболизма индивидуальной и социальной психики), информодинамика (наука об открытых информационных системах), информатология (наука о получении, сохранении и передаче информации для различных множеств объектов) и т. д.

Подобно тому, как введение понятия энергии позволило рассматривать все явления природы с единой точки зрения, так и введение понятия информации, единой меры количества информации позволяет подойти с единой общей точки зрения к изучению самых различных процессов. Количество переданной информации и тем более эффект воздействия информации на получателя не определяются количеством энергии, затраченной на её передачу. Поэтому одной из важнейших особенностей информации является её неэнергетический характер.

Сущность использования информации состоит в том, что приведение в действие больших масс вещества и процессов передачи и преобразования больших количеств энергии могут направляться, контролироваться при помощи небольших масс и количеств энергии, несущих информацию. Так, например, на автоматизированных робототехнических комплексах изготавливаются сложнейшие детали и узлы современных машин под воздействием весьма маломощных в энергетическом смысле управляющих сигналов, подаваемых встроенными в технологическую линию микропроцессорами на исполнительные органы станков и роботов.

Ценность информации зависит от многих обстоятельств и не поддаётся формализации. Но во многих случаях, в которых применим статистический подход к процессам получения и передачи информации, полезным оказывается введённое К.Шенноном представление о количестве информации, содержащемся в том или ином сообщении. Представление о количестве информации тесно примыкает к понятию энтропии. Связь между этими понятиями становится понятной, если учесть, что получение любой информации (например, в процессе измерения какой-либо физической величины) неизбежно связано с затратами энергии и времени.

2.1 Свойства информации

На свойства информации влияют как свойства исходных данных, составляющих её содержательную часть, так и свойства методов, фиксирующих эту информацию. Фундаментальными свойствами смысловой информации являются: запоминаемость, передаваемость, преобразуемость, воспроизводимость, стираемость, объективность, достоверность, полнота, точность, полезность, ценность, актуальность, понятность, доступность, краткость и т. д.

Выделяют следующие свойства информации:

Объективность информации характеризует её независимость от чьего-либо мнения или сознания, а также от методов получения. Более объективна та информация, в которую методы получения и обработки вносят меньший элемент субъективности. Информация – это отражение внешнего объективного мира. Информация объективна, если она не зависит от методов её фиксации, чьего-либо мнения, суждения, т.е. если она существует независимо от человеческого сознания. Пример: сообщение «На улице тепло» несёт субъективную информацию, а сообщение «На улице 22°C» – объективную, но с точностью, зависящей от погрешности средства измерения. Объективную информацию можно получить с помощью исправных датчиков, измерительных приборов. Отражаясь в сознании человека, информация перестаёт быть объективной, т.к. преобразовывается в зависимости от мнения, суждения, опыта, знаний конкретного субъекта.

Достоверность – свойство информации быть правильно воспринятой. Достоверность отражает истинное положение дел. Объективная информация всегда достоверна, но достоверная информация может быть как объективной, так и субъективной. Достоверная информация помогает принять нам правильное решение. Причинами недостоверности могут быть: преднамеренное искажение (дезинформация); непреднамеренное искажение субъективного свойства; искажение в результате воздействия помех; ошибки фиксации информации. Обычно достоверность информации достигается указанием времени свершения событий, сведения о которых передаются; сопоставлением данных, полученных из различных источников; своевременным вскрытием дезинформации; исключением искаженной информации и др.

Полнота. Информацию можно считать полной, когда она содержит минимальный, но достаточный для принятия правильного решения набор показателей. Как неполная, так и избыточная информация снижает эффективность принимаемых решений.

Адекватность – степень соответствия реальному объективному состоянию дела. Различают три её формы: синтаксическая, семантическая и прагматическая. 1. Синтаксическая адекватность отображает формально-структурные характеристики информации и не затрагивает её смыслового содержания. 2. Семантическая (смысловая) адекватность определяет степень соответствия информации об объекте самому объекту. 3. Прагматическая (потребительская) адекватность отражает отношение информации и её потребителя; она связана с ценностью, полезностью использования информации потребителем для достижения поставленной цели.

Доступность – мера возможности получить ту или иную информацию.

Актуальность – это степень соответствия информации текущему моменту времени. Это – важность для настоящего времени, злободневность, насущность. Только вовремя полученная информация может быть полезна.

Ценность (полезность, значимость) обеспечивает решение поставленной задачи; она нужна для того чтобы принимать правильные решения. Полезность может быть оценена применительно к нуждам конкретных ее потребителей и оценивается по тем задачам, которые можно решить с её помощью. Самая ценная информация – объективная, достоверная, полная, и актуальная. При этом следует учитывать, что и необъективная, недостоверная информация (например, художественная литература), имеет большую значимость для человека.

Понятность (ясность) – выражена на языке, доступном получателю.

Точность определяется степенью её близости к реальному состоянию объекта, процесса, явления и т. п.

Кроме этого информация обладает еще следующими свойствами:

1) Атрибутивные свойства (атрибут – неотъемлемая часть чего-либо). Важнейшими среди них являются дискретность (информация состоит из отдельных частей, знаков) и непрерывность (возможность накапливать информацию)

2) Динамические свойства связаны с изменением информации во времени: копирование – размножение информации; передача от источника к потребителю; перевод с одного языка на другой; перенос на другой носитель; старение (физическое – носителя, моральное – ценностное)

3) Практические свойства – информационный объём и плотность

2.2 Виды информации

Для человека информация подразделяется на виды в зависимости от типа воспринимающих её рецепторов.

Виды информации различаются по способу восприятия (визуальная, аудиальная, тактильная, обонятельная, вкусовая), по форме представления (текстовая, числовая, графическая, музыкальная, комбинированная), по общественному значению (массовая, например, обывденная, общественно-политическая, эстетическая), специальная (научная, производственная, техническая, управленческая) и личная (знания, умения, интуиция).

Визуальная – воспринимаемая органами зрения (графическая или изобразительная) – первый вид, для которого был реализован способ хранения информации об окружающем мире в виде наскальных рисунков, а позднее в виде картин, фотографий, схем, чертежей на бумаге, холсте, мраморе и др. материалах, изображающих картины реального мира

Текстовая – передаваемая в виде символов, предназначенных обозначать лексемы языка.

Это – способ кодирования речи человека специальными символами – буквами, причём разные народы имеют разные языки и используют различные наборы букв для отображения речи; особенно большое значение этот способ приобрел после изобретения бумаги и книгопечатания.

Числовая – в виде цифр и знаков, обозначающих математические действия. Это – количественная мера объектов и их свойств в окружающем мире; особенно большое значение приобрела с развитием торговли, экономики и денежного обмена; для её отображения используется метод кодирования специальными символами – цифрами, причём системы кодирования (счисления) могут быть разными.

Звуковая – устная или в виде записи передача лексем языка аудиальным путем. Мир вокруг нас полон звуков и задача их хранения и тиражирования была решена с изобретением звукозаписывающих устройств в 1877.

Музыкальная – разновидность звуковой. Для этого вида был изобретен способ кодирования с использованием специальных символов, что делает возможным хранение её аналогично графической информации

Видеоинформация – способ сохранения «живых» картин окружающего мира, появившийся с изобретением кино.

Существуют также виды информации, для которых до сих пор не изобретено способов их кодирования и хранения: **тактильная** информация, передаваемая ощущениями, и **органолептическая** (обонятельная и вкусовая), передаваемая запахами и вкусами и др.

По предназначению (общественному значению) информация бывает

Массовая содержит тривиальные сведения и оперирует набором понятий, понятным большей части социума. Она бывает обывденной, общественно-политической, эстетической.

Специальная содержит специфический набор понятий, при использовании происходит передача сведений, которые могут быть не понятны основной массе социума, но необходимы и понятны в рамках узкой социальной группы, где используется данная информация. Она бывает научной, технической, управленческой, производственной.

Личная – набор сведений о какой-либо личности, определяющий социальное положение и типы социальных взаимодействий внутри популяции. Сюда относятся наши знания, умения, интуиция.

Дезинформация – распространение искаженных или заведомо ложных сведений для достижения пропагандистских, военных (введение противника в заблуждение) или других целей.

Важный вид информации – информация, представленная в глобальной сети Интернет. Здесь используются особые приёмы хранения, обработки, поиска и передачи распределенной информации больших объемов и особые способы работы с различными видами информации. Постоянно совершенствуется программное обеспечение, позволяющее проводить коллективную работу с информацией всех видов.

Объектом приложений информатики являются самые различные науки и области практической деятельности (например, управление производственным процессом, проектирование, финансовых операциях, образовании и т.п.). В конкретных приложениях существуют такие категории информации, как: аэронавигационная, геологическая, инсайдовая, социальная, секретная, генетическая – совокупность хранимых и наследственных биологических признаков, и др.

2.3 Качество информации

Возможность и эффективность использования информации определяется её качеством, под которым понимают степень её соответствия потребностям потребителей. Свойства информации являются относительным, так как зависят от потребностей потребителя информации.

Потребительскими показателями качества информации являются:

Содержательность или внутреннее качество (качество, присущее собственно информации и сохраняющееся при её переносе из одной системы в другую) Содержательность информации отражает семантическую ёмкость, равную отношению величины семантической информации в сообщении к объёму обрабатываемых данных.

Репрезентативность информации связана с правильностью её отбора и формирования в целях адекватного отражения свойств объекта.

Значимость (свойство сохранять ценность для потребителя с течением времени)

Идентичность (свойство, заключающееся в соответствии информации состоянию объекта) Кумулятивность (свойство информации, заключённой в массиве небольшого объёма достаточно полно отражать действительность). С течением времени количество информации растёт, информация накапливается, происходит её систематизация, оценка и обобщение. Это свойство назвали ростом и кумулированием информации.

Защищённость или внешнее качество (качество, присущее информации, находящейся или используемой только в определённой системе), включая сохранность, достоверность и конфиденциальность.

Логичность, компактность, удобная форма представления облегчает понимание и усвоение информации.

Старение информации заключается в уменьшении ее ценности с течением времени. Старит информацию не само время, а появление новой информации, которая уточняет, дополняет или отвергает полностью или частично более раннюю. Научно-техническая информация стареет быстрее, эстетическая (произведения искусства) – медленнее.

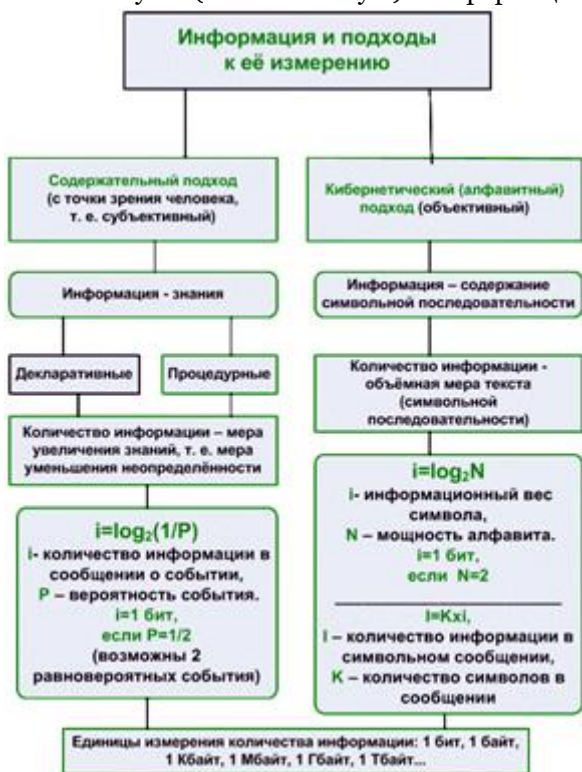
Социальная (общественная) информация обладает ещё и дополнительными свойствами: имеет семантический (смысловой) характер, т. е. понятийный, так как именно в понятиях обобщаются наиболее существенные признаки предметов, процессов и явлений окружающего мира. Информация имеет языковую природу (кроме некоторых видов эстетической информации, например изобразительного искусства). Одно и то же содержание может быть выражено на разных естественных (разговорных) языках, записано в виде математических формул и т. д.

2.4 Количество информации

Понятно, что измерить количество смысловой информации невозможно. Какое количество информации содержится, к примеру, в тексте романа «Война и мир», во фресках Рафаэля или в генетическом коде человека? Ответа на эти вопросы наука не даёт и не даст.

Тем не менее, в определенных условиях можно пренебречь качественными особенностями информации, выразить её количество числом, а также сравнить количество информации, содержащееся в различных группах данных. Физическую (термодинамическую, статистическую) и

техническую (шенноновскую) информации,



уменьшающие энтропию и неопределённость, измерить можно.

И в физическом и в техническом подходах к определению количества информации не обсуждается ценность того или иного информационного сообщения.

Меры информации бывают семантического, синтаксического и прагматического уровня.

Подход к измерению информации бывает содержательным (вероятностным), который осуществляется через неопределённость знаний с учётом вероятности событий, или алфавитным, который осуществляется через количество символов с учётом информационного веса символов.

Смысловая информация всегда связана с материальным носителем: это может быть сигнал в любой материальной форме, числовой, символьный код на печатной основе и т.д. Информацию можно измерить, как и любой материальный объект. Количество информации, затраченное на описание конкретного объекта, можно оценить по количеству букв, затраченных на описание модели объекта. Поскольку, каждый символ естественного языка можно закодировать одним определённым числом информационных

единиц (на один символ требуется 1 байт, т.е. 8 бит), то легко вычислить полный объём информации, связанный с описанием любого объекта, процесса, явления. Это так называемый *алфавитный подход* измерения количества информации.

Есть другой количественный подход – *технический* (кибернетический, шенноновский), изложенный в работах К.Шеннона и Н.Винера. Изучая системы передачи информации, К.Шеннон пришёл к выводу, что каждое элементарное сообщение на выходе системы уменьшает неопределённость исходного множества сообщений, при этом смысловой аспект сообщения не имеет никакого значения. За единицу количества информации было предложено принять «количество информации, передаваемое при одном выборе между равновероятными альтернативами». Эта наименьшая единица информации называется бит.

Количество кодированной информации:

- мера информации, сообщаемой появлением события определенной вероятности; – мера оценки информации, содержащейся в сообщении;

- мера, характеризующая уменьшение неопределенности, содержащейся в одной случайной величине относительно другой.

Единицами кодированной информации являются бит и байт.

Бит – минимальная единица измерения количества передаваемой или хранимой информации, соответствующая одному двоичному разряду, способному принимать значений 0 или 1.

Байт – в запоминающих устройствах – наименьшая адресуемая единица данных в памяти компьютера, обрабатываемая как единое целое. По умолчанию байт считается равным 8 битам. Обычно в системах кодирования данных байт представляет собой код одного печатного или управляющего символа.

Информация в один бит уменьшает неопределённость информационной системы в два раза. Для вычисления средней величины количества информации, связанного с положительным исходом некоторого события x из множества m событий К.Шеннон предложил формулу:

$$H_x = -\sum p_i \log_2 p_i, \quad (1)$$

где p_i – вероятность i -го события.

Эта формула характеризует энтропию (меру неопределённости) системы. Изначально это понятие появилось в физике, и характеризует оно степень неупорядоченности, т.е. неопределённости микросостояния, в котором система (например, термодинамическая) может находиться в данный момент времени. Значение H_x достигает максимума для равновероятных событий, т.е. при $p_i = 1/m$ формула К.Шеннона упрощается:

$$H_{max} = -\log_2 m = \log_2 m \quad (\text{формула Р.Хартли}) \quad (2)$$

Пример: Рассмотрим систему с 256 возможными состояниями, например, расширенную кодовую таблицу символов, тогда H_{max} будет равно 8 битам ($\log_2 256 = 8$). Другими словами, восемь

бит достаточно, чтобы точно описать исход любого события (например, выборку определённого символа из таблицы).

Шеннон подошёл к проблеме как инженер и рассмотрел количество битов передаваемой в течение некоторого времени информации, т.е. её поток. Одной из особенностей такого подхода к определению понятия «информация» является то, что никак не учитываются энергетические или какие-нибудь иные ресурсные затраты, связанные с её передачей, приёмом и обработкой. В частности, процессы передачи и обработки информации и процессы, управляемые этой информацией, могут отличаться по энергетике во много раз. Здесь информация обсуждается как «надматериальная» субстанция, которая, тем не менее, упорядочена в физическом времени. Это следствие свойств информации, как возможность её передачи и преобразования посредством материальных носителей, в частности, возможность её запоминания и извлечения из памяти. Для сохранения информации необходимо «свёртывать» упорядоченную во времени последовательность сигналов в некоторые упорядоченные, структурные изменения в устройстве памяти. Извлечение же информации из памяти – обратный процесс восстановления упорядоченной во времени последовательности сигналов, с использованием тех структурных изменений в памяти, которые произошли при запоминании.

Передача информации через среду является частным случаем её преобразования: фактически, передача может рассматриваться как последовательное запоминание и восстановление сигналов от точки к точке пространства вдоль пути её распространения. Самый высокий уровень информационной энтропии имеют случайные последовательности знаков. Поскольку часть данных при преобразованиях информации может теряться, то передаваемая и принимаемая последовательности сигналов, или в ином, нетехническом контексте, – последовательности знаков, могут отличаться по информационному содержанию. Это отражено в соответствующих соотношениях, где учтено увеличение информационной энтропии в случае искажения части знаков при преобразованиях.

При термодинамическом подходе оценивается термодинамическая вероятность существования системы при каких-либо условиях до и после получения порции информации, а количество информации при этом оценивается через разность энтропий конечного и начального состояний, т. е. характеризует изменение уровня упорядоченности системы. Энтропия каждого состояния оценивается по формуле Больцмана:

$$S = k \ln(N), \quad (3)$$

где k – постоянная Больцмана, N – количество способов, которыми может быть реализовано данное состояние системы, а \ln – натуральный логарифм.

Следует отметить, что однозначная связь между шенноновской и больцмановской формулами энтропии не всегда возможна хотя бы потому, что в одном случае речь идёт о потоке знаков, а другом – об изменениях в некоторой структуре. В качестве примера, когда это все же так, можно привести какое-нибудь устройство памяти, запоминающее короткие информационные сообщения.

Замечание. Существует ещё один способ определения количества информации, основанный на энтальпии, предложен А.Н.Колмогоровым. Об алгоритмическом подходе Колмогорова к информации и о его теории сложности мы расскажем в одной из последующих лекций.

Есть так же **содержательный (субъективный) подход** к измерению информации. Содержание информации кроме количественного параметра имеет ещё и смысловую характеристику, которая определяется способностью пользователя понимать поступившее сообщение. Эта способность зависит от тезауруса пользователя, т.е. совокупности сведений и знаний, которыми располагает пользователь. Если тезаурус пользователя близок к нулю, то любая новая информация им не воспринимается (он её не понимает) и в этом случае семантическая компонента информации для него равна нулю (*для меня, например, любой текст, записанный китайскими иероглифами будет давать нулевую информацию, тогда как для китайца (если он грамотен, конечно) тот же текст будет крайне информативен*). Таким образом, одно и то же сообщение может нести для пользователя разное количество смысловой информации.

Подходы к определению понятия «количество информации», основанные на том, что информацию, содержащуюся в сообщении, можно нестрого трактовать в смысле её новизны или, иначе, уменьшения неопределённости наших знаний об объекте, не привели к особым успехам. Когда говорят о мере смысловой информации, обычно подразумевают не количество, а ценность информации.

2.5 Ценность информации

Существует ещё один подход к измерению информации, идущий от «здравого смысла». Он связан с идеей о полезности, или **ценности информации**. Попытки определять ценность

смысловой информации предпринимались с биологических и психологических позиций, но общепринятых подходов пока и не существует.

В биологическом аспекте полезность принимаемой информации связана с увеличением выживаемости организма или повышением успешности существования популяции. Получение организмом полезного информационного сообщения означает совершенствование инструкций его взаимодействия с окружающей средой. В психологии поведение обсуждается иначе: не с точки зрения улучшения или ухудшения биовыживательных стратегий, а на языке мотиваций. Понятно, что в контекстах различных мотиваций, одно и то же информационное сообщение может иметь разную ценность. Естественно, что далеко не любые мотивации подразумевают действия, объективно полезные с точки зрения выживания организма или эволюционного успеха популяции организмов.

Так или иначе, но и в биологическом и в психологическом аспектах одно и то же информационное сообщение не может быть одинаково ценным для любых реципиентов. Его полезность связана с особенностями воспринимающей стороны, а эти особенности отличаются у разных организмов и могут меняться со временем. Поэтому трудно предложить способ вычисления ценности информационного сообщения в общем случае. Однако несложно определить эту величину в биологическом контексте, если отвлечься от отдельных организмов и воспользоваться популяционным подходом.

Под ценностью информации обычно понимается её важность, нужность для принятия решений. Определение ценности смысловой информации субъективный процесс и в большинстве случаев нет объективных критериев определения ценности конкретных видов информации при принятии информационных решений. Иногда ценность информации определяется приращением вероятности достижения цели вследствие получения информации. Но практическое применение этого подхода затруднено тем, что невозможно определить с достаточной точностью вероятности достижения конкретной цели до и после получения информации.

Намерение связать понятие ценности информации с понятием цели представляются плодотворным, но имеющиеся пути к количественной оценке ценности малоэффективны, ибо они основаны на использовании предварительных оценок априорных вероятностей цели, знания и последовательных действий потребителя. Трудно сформулировать в информационных понятиях цель, стоящую перед потребителем информации. Кроме этого, ценность не является чисто природным свойством информации, а образуется в результате предметно-практического взаимодействия объекта и субъекта. Ценность является тем, что требуется человеку для его практически-познавательной деятельности, а практика способствует объективности оценок.

Информация необходима для объектов, потребляющих её, как средство обеспечения их существования, позволяет реагировать на изменения в окружающем мире.

Ценность объективна как порождение практического взаимодействия объекта и субъекта; она объективна, т.к. образуется в процессе общественно-исторической практики (эта объективность может и не осознаваться субъектом). В тоже время оценка субъективна. Оценка как выражение субъективного отношения к ценности может быть истинной, если она адекватна ценности, или ложной, если она ценности не соответствует.

* _ * _ *

Таким образом, обычно полагают, что существует три сорта информации. Первый из них – физическая информация – предмет интереса термодинамики и статистической физики. Вторая – техническая, та самая, которая передается по телеграфным линиям или отображается на экранах радиолокаторов. Количество такой информации может быть в точности вычислено, и процессы, происходящие с такой информацией, подчиняются физическим законам. Третий сорт информации – информация семантическая, то есть смысловая. Это та самая информация, которая содержится, к примеру, в литературном произведении. Для такой информации тоже предлагаются различные количественные оценки и даже строятся математические теории. Но общее мнение скорее сводится к тому, что оценки здесь весьма условны и приблизительны и алгеброй гармонию не проверишь.

Некоторые учёные считают, что информация едина, но вот количественные оценки должны быть разными. Отдельно нужно измерять количество информации, причём количество информации – строгая оценка, относительно которой можно развивать единую строгую теорию. Кроме количества информации, следует измерять ещё и ценность. А вот с ценностью информации происходит то же самое, что и с понятием семантической информации. С одной стороны, вроде её можно померить или даже вычислить, а с другой стороны, все эти вычисления справедливы лишь в ограниченном числе случаев. И вообще, кто может точно вычислить, скажем, ценность крупного научного открытия или письма любимой?

2.6 Информационные процессы

Информация – категория нематериальная, следовательно, она должна быть связана с какой материальной основой, без этого она просто не сможет существовать.

Носители информации – среда или физическое тело для передачи, хранения и воспроизведения информации. (Это электрические, световые, тепловые, звуковые, радио сигналы, магнитные и лазерные диски, печатные издания, фотографии и т.д.).

Носитель информации – материальный объект или среда, которые служат для представления или передачи информации (бумага, диск, воздух и т.п.).

Хранение информации связано с фиксацией состояния носителя (например, уже напечатанный текст на бумаге), а распространение информации – с процессом, который протекает в носителе. Но только с нестационарным процессом, т.е. характеристики которого меняются. (**Стационарный процесс информацию не переносит – лампа просто горит и всё, а мигает – уже азбука Морзе**). И при этом информация связывается не с существованием процесса (**просто горит лампа**), а именно с изменением какой-либо его характеристики.

Информация хранится, передаётся и обрабатывается в символьной (знаковой) форме. Одна и та же информация может быть представлена в различной форме: 1) Знаковой письменной, состоящей из различных знаков, среди которых выделяют символьную в виде текста, чисел, символов; графическую; табличную и т.д.; 2) В виде жестов или сигналов; 3) В устной словесной форме (разговор). Представление информации осуществляется с помощью языков, как знаковых систем, которые строятся на основе определенного алфавита и имеют правила для выполнения операций над знаками.

Язык – определенная знаковая система представления информации. Существуют:

Естественные языки – разговорные языки в устной и письменной форме. В некоторых случаях разговорную речь могут заменить язык мимики и жестов, язык специальных знаков (например, дорожных);

Формальные языки – специальные языки для различных областей человеческой деятельности, которые характеризуются жестко зафиксированным алфавитом, более строгими правилами грамматики и синтаксиса. Это язык музыки (ноты), язык математики (цифры, математические знаки), системы счисления, языки программирования и т.д. В основе любого языка лежит алфавит – набор символов/знаков. Полное число символов алфавита принято называть мощностью алфавита.

Операции с информацией

создавать	принимать	комбинировать	хранить
передавать	копировать	обрабатывать	искать
воспринимать	формализовать	делить на части	измерять
использовать	распространять	упрощать	разрушать
запоминать	преобразовывать	собирать	и т. д.

Все эти процессы, связанные с определенными операциями над информацией, называются информационными процессами.

Информационный процесс – изменение с течением времени содержания информации или представляющего его сообщения. Он имеет следующие виды: создание новой информации; преобразование информации; удаление информации; передача информации.

Информационные процессы – это процессы, связанные с получением, хранением, обработкой и передачей информации (т.е. действия, выполняемые с информацией). Т.е. это процессы, в ходе которых изменяется содержание информации или форма её представления.

Источник информации $\xrightarrow{\text{Канал связи}}$ Приёмник информации

Информация передаётся в форме сообщений от некоторого источника информации к её приёмнику посредством канала связи между ними. Источник посылает передаваемое сообщение, которое кодируется в передаваемый сигнал. Этот сигнал посылается по каналу связи. В результате в приёмнике появляется принимаемый сигнал, который декодируется и становится принимаемым сообщением. Основная функция приёмника данных – фильтрация, игнорирование шума и выявление нового в бесконечном потоке обычного. Обмен информацией не приводит, как правило, к уничтожению источника, обогащая приёмник дополнительным знанием.

Изменение характеристики носителя, которое используется для представления информации, называется сигналом, а значение этой характеристики, отнесенное к некоторой шкале измерений, называется параметром сигнала.

Примеры:

Способ передачи	Процесс	Параметры сигнала
Звук	Звуковые волны	Высота и громкость звука

Изображение	Световые волны	Частота и амплитуда световых волн
-------------	----------------	-----------------------------------

Одиночный сигнал не может содержать много информации. Нужно много сигналов.

Сообщение – последовательность сигналов.

Сообщение, таким образом, служит переносчиком информации, а информация является содержанием сообщения.

В отличие от материи и энергии информация может создаваться и исчезать.

Основные виды информационных процессов:

- создание новой информации;
- преобразование информации;
- уничтожение информации;
- передача информации.

Понятие «информация» предполагает наличие двух объектов – источника и приемника информации. Информация передается от источника к приёмнику в материально-энергетической форме в форме сигналов, распространяющихся в определенной среде.

Источник информации – субъект или объект, порождающий информацию и представляющий ее в виде сообщения.

Получатель информации – субъект или объект, принимающий сообщение и способный правильно его интерпретировать.

Замечание. Получатель информации не равен получателю сообщения («слышу речь на керунди – я получатель сообщения, но не информации»).

Итак, информация передается в форме сообщений от некоторого источника информации к получателю посредством системы связи между ними. Совокупность технических средств, используемых для передачи сообщений от источника к получателю, называется системой связи. Канал связи - совокупность технических устройств, обеспечивающих передачу от передатчика к приёмнику. Состоит из кодирующего и декодирующего устройства. Кодирующее устройство предназначено для кодирования информации (преобразования исходного сообщения от источника к виду, удобному для передачи информации). Декодирующее устройство предназначено для преобразования полученного сообщения в исходное.

Для передачи информации на большие расстояния первоначально использовались закодированные световые сигналы, с изобретением электричества – передача закодированного определенным образом сигнала по проводам, позднее – с использованием радиоволн.

Информационными сообщениями могут обмениваться любые системы, состояние которых может управляться с помощью внешних данных. В качестве таких систем могут выступать не только живые существа, но и, например, компьютеры, поскольку в общем случае неважно осуществляется ли информационный обмен «по собственной воле», или же он кем-то намеренно запрограммирован. Подразумевается, что для приёма управляющих данных имеются специальные рецепторы или датчики, так что те или иные, влияющие на функционирование, но непосредственно не воспринимаемые воздействия (например, сильный радиационный фон или яд, подмешанный злоумышленником в пищу), не рассматриваются в качестве информационных сообщений.

Частным случаем информационных сообщений, которыми обмениваются люди, являются мемы.

Мем – единица культурной информации. Мем – любая идея, символ, манера или образ действия, осознанно или неосознанно передаваемые от человека к человеку посредством речи, письма, видео, ритуалов, жестов и т.д.

Под информационным сообщением конечной протяженности, имеющим ценность, понимается такое, которое модифицирует некоторые особенности взаимодействия системы со средой. Здесь мы полностью отвлекаемся от физических особенностей среды и типа систем, обменивающихся сообщениями, а также от семиотики кодирования и всей «механики» передачи сообщений и реакций системы. Информационное сообщение может вызывать относительно кратковременные, обратимые изменения поведения системы; это происходит, когда сообщение сигнализирует об известной ситуации и подразумевает стандартную реакцию, запрограммированную устройством системы или имеющимися инструкциями. Такие сообщения называются оповещающими или индуцирующими информационными сообщениями. Сообщение может быть и обучающим информационным сообщением, и тогда оно вызывает необратимые, или весьма длительные модификации свойств системы. Такие модификации могут вести в дальнейшем к изменениям эволюционной траектории всей системы. Обучающее сообщение может быть одновременно и индуцирующим, однако обратное утверждение неверно.

В биологическом контексте такой подход подразумевает, что после восприятия биосистемой обучающего информационного сообщения с положительной ценностью её способности к выживанию при некоторых условиях увеличиваются, поскольку эта биосистема приобретает новые возможности в плане использования ресурсов среды, избегания опасностей, а также иногда и в плане дальнейшего развития. Понятно, что это происходит потому, что в

результате восприятия обучающего сообщения, биосистема приобретает новые стереотипы поведения, которые обеспечивают адекватность реакций на сходные сообщения из того же. Ценность информационного сообщения может быть и отрицательной – сообщение при этом является вредным, – если оно, например, содержит какие-нибудь ложные сведения об окружающем мире.

Частным случаем информационных сообщений являются такие, которые изменяют специализацию системы; у технических систем их называют *переключающими*. Такие сообщения влекут два последствия: появление новых свойств и потерю имевшихся, например, запоминание новых способов поведения и забывание некоторых использовавшихся ранее. Каждое переключающее сообщение рассматривается как два независимых, но приходящих одновременно и вызывающих различные изменения у принимающей системы. Эти изменения могут иметь неодинаковые по длительности последствия; для того, чтобы переключающее информационное сообщение было обучающим нужно, чтобы некоторые из последствий носили долговременный характер.

Информационное сообщение одной и той же ценности может быть передано разными способами и, поэтому, может содержать разное количество шенноновской информации. И наоборот: разные сообщения, кодируемые и передаваемые одинаковым количеством битов, могут нести как ценные сведения, так и быть совершенно бессодержательными для части или же для всех получателей информации (белый шум). Тем не менее, при работе в сети *Internet* платят не за ценность полученной информации, а просто за количество переданных бит. Вот в наглядном виде материализованная разница между различными подходами к информации!

Заметим, что этот простой подход к определению информационной ценности, разумеется, не единственный. Часто ценность информации определяют как степень её непредсказуемости, поэтому повторение «одной и той же информации» всегда приводит к снижению её ценности. Нетрудно догадаться, откуда проистекает такой взгляд на вещи – из педагогической практики. Заметим, что повторяющиеся информационные сообщения не обязательно сразу теряют свою ценность, если они используются, например, для выработки рефлекса. Не теряют ценность и повторные сообщения, сигнализирующие о появлении одной и той же опасности.

*__*__*

Подводя итог относительно понятия ИНФОРМАЦИЯ, можно сказать, что информацию нельзя считать лишь техническим термином, это фундаментальная философская категория, которой присущи такие свойства как запоминаемость, передаваемость, преобразуемость, воспроизводимость, стираемость. Можно дать следующее определение:

Информация – специфический атрибут реального мира, представляющий собой его объективное отражение в виде совокупности сигналов и проявляющийся при взаимодействии с «приемником» информации, позволяющим выделять, регистрировать эти сигналы из окружающего мира и по тому или иному критерию их идентифицировать.

Таким образом:

- информация объективна, так как это свойства материи – отражение;
- информация проявляется в виде сигналов и лишь при взаимодействии объектов;
- одна и та же информация различными получателями может быть интерпретирована по-разному.

Информация имеет определенные функции и этапы обращения в обществе. Основными из них являются:

Познавательная, цель которой получение новой информации. Функция реализуется в основном через такие этапы обращения информации, как:

- её синтез (производство);
- представление;
- хранение (передача во времени);
- восприятие (потребление).

Коммуникативная функция общения людей, реализуемая через такие этапы обращения информации, как:

- передача (в пространстве);
- распределение.

Управленческая, цель которой формирование целесообразного поведения управляемой системы, получающей информацию. Эта функция информации неразрывно связана с познавательной и коммуникативной и реализуется через все основные этапы обращения, включая обработку.

Без информации не может существовать жизнь в любой форме и не могут функционировать созданные человеком любые информационные системы. Без неё биологические и технические системы представляют груды химических элементов. Общение, коммуникации, обмен информацией присущи всем живым существам, но в особой степени – человеку. Будучи аккумулированной и обработанной с определенных позиций, информация даёт новые сведения,

приводит к новому знанию. Получение информации из окружающего мира, её анализ и генерирование составляют одну из основных функций человека, отличающую его от остального живого мира.

**Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Химический факультет**

Междисциплинарный университет Бекмана

**Профессор, д.х.н.
Игорь Николаевич Бекман**

РИСК

Курс лекций

Содержание

От автора

Предисловие

1. Опасность, безопасность и риск

2. Гомеостаз риска

3. Анализ и управление риском

4. Статистический анализ риска

5. Уравнения математической физики в анализе риска

6. Геометрия фракталов в анализе риска

7. Математическая теория катастроф и риск

8. Информатика в теории риска

9. Экологический риск

10. Радиационный риск

11. Ядерный риск

12. Радионуклидный риск

13. Медицинский риск

14. Финансовый риск

15. Управленческий риск

16. Транспортный риск

17. Риск животного и растительного мира

Заключение

Рекомендованная литература

Аннотация

Курс лекций "Риск" посвящен рассмотрению особенностей риска как результата деятельности отдельных людей, групп населения и общества в целом, так и функционирования машин, станков и крупных производств, экономического, политического и управленческого риска. На многочисленных примерах рассмотрены качественные особенности различных видов риска. Описаны способы количественной характеристики риска в рамках таких разделов математики, как статистический анализ, уравнения математической физики, информатика и компьютерные науки, фрактальная геометрия и теория катастроф и революций. Основное внимание уделено развитию у слушателей навыков анализа и управления риском. Курс представляет интерес для гуманитариев (экономистов, журналистов, юристов), естественников (географов, химиков, физиков, биологов), политиков, медиков, пациентов, управленцев, путешественников, спортсменов, уголовников и автолюбителей - всех, кто по жизни сталкивается с опасностью и риском, а любит безопасность и уют.

Замечание. Этот курс не вызвал интереса у слушателей. Поэтому ограничусь двумя лекциями.

Оглавление

От автора	3
ПРЕДИСЛОВИЕ.....	4
Лекция 1. ОПАСНОСТЬ, БЕЗОПАСНОСТЬ И РИСК	6
Лекция 2. ГОМЕОСТАЗ РИСКА	21

От автора

Люди по-разному относятся к риску: есть профессиональные рискотатели (мотоциклисты, террористы, картежники и воры), т.е. искатели приключений, а есть обыватели, панически боящиеся какого-либо риска. Но все они рискуют: *"нет дела без риска"*, и жизни без него тоже нет. И в бомбоубежище метеорит тебя достанет...

Одни осознают риски и пытаются ими управлять, другие нет. Последние либо, в принципе, опасность не осознают, либо осознают, но не вмешиваются в дела судьбы. *Авось – вся надежда наша*. Между тем мир риска – занимательный мир, мир приключений и высокой математики, один из тех миров, в которых пребывает все человечество, часто не осознавая это, как люди не замечали, чем они дышат, пока химики не открыли кислород, азот и диоксины. Многие, впрочем, и сейчас не осознают, и жить им это не мешает. Но есть и любопытные, кому это интересно, а есть и торговцы риском.

Для лиц, интересующихся фундаментальными основами риска, и читаются эти лекции.

А почему за просвещение в таком сомнительном деле взялся мирный химик, всю жизнь тихо titрующий что-то под тягой?

Есть 4 причины.

1. С риском я знаком не понаслышке. Я конечно – не рискотатель, но и не обыватель. Жизнь я прожил на уровне риска выше среднего, похоже, существенно выше среднего. Даже по формальным признакам. На кафедре радиохимии я уже более 50 лет работаю с радием и радоном, т.е. с радиоэлементами высшей (группа А) токсичности; мастер спорта по горному туризму, 1-ый разряд по слаломной байдарке, профессиональный водолаз, участник 21 экспедиции и 40 походов. Поверьте на слово – у меня есть, что рассказать о риске, своем и ближайших сподвижников. И раз я цел, и разменял восьмой десяток, то, значит, правильно оценивал риск, и грамотно им управлял. Чего и вам советую.

2. Занимаясь математической химией и теоретической экологией, я осознал, что практически все аспекты риска человека и машины с удовлетворительной степенью точности можно описать подходящим математическим аппаратом (хотя с точки зрения развития теории риска современная математика и вычислительная техника находятся в сильно недоразвитом состоянии). Речь идет не о создании какой-то новой специальной математики, но методология, целенаправленный подбор алгоритмов из требуемых разделов математики, позволяет существенно продвинуться в количественном описании конкретных видов риска. Мне показалось, что такие подходы полезны для общества.

3. Дистанционный междисциплинарный университет моего имени призван заниматься развитием и преподаванием дисциплин, локально или слабо представленных в традиционных факультетских курсах. Поразительно, но риск, т.е. дисциплина, затрагивающая всех и каждого, практически не преподается в ВУЗах. Между тем, владение этим материалом важно для экономистов, журналистов, юристов, географов, психологов, химиков, физиков, биологов, военных и даже математиков. С риском постоянно имеют дело ученые, инженеры, политики и врачи. Не говоря уж о писателях. Не дурно было бы им узнать, с чем они имеют дело слегка поглубже.

4. Нами правят люди большого риска и чудовищной безграмотности. Безграмотность их, естественно, проявляется во всех областях, не только в безопасности и риске. Но образовывать их по всем предметам мне недосуг (да они и не просят), но разъяснить им, что такое риск, как его следует анализировать, и как им управлять, я могу. Поэтому курс предназначен не для студентов, а для управленцев, уже владеющих всеми степенями-званиями-должностями, но, несмотря на это, желающих узнать что-то умное и полезное об опасности, безопасности и рисках. Хотя и студентам польза будет.

Если что-то сказано, кем-то услышано, значит, будет и сделано.

Вперёд!

ПРЕДИСЛОВИЕ

Если бы риск преподавался школьникам, то я начал бы так:

Будильник зазвенел, но ты вскочил не сразу, потом застрял в ванной, потом собирал разбросанные учебники, наконец, глянул на часы: Опаздываю!!! Возникла проблема риска. Как оценить величину риска опоздания в школу и наметить стратегию его подавления? Мы знаем время, оставшееся до начала уроков, и время, традиционно затрачиваемое на путь от дома до школы. Если первая величина меньше второй, то оптимальной стратегией будет остаться дома и рассматривать различные варианты будущих оправданий перед родителями и учителями (живот схватило, унитаз потек и т.п.). Если первая величина больше второй, то шанс успеть в школу еще есть и мы вступаем в область вероятностей. Какова вероятность добежать без приключений? Конкретнее: какова вероятность встречи с хулиганами, с собаками, подругами, милиционерами, машинами и т.п., какова вероятность подскользнуться на льду или слететь в канаву, возможна ли отмена занятий или хотя бы первого урока? Какое время требуется на преодоление каждого из возможных препятствий? Что лучше: воспользоваться попутным транспортом (часто ли он сегодня ходит и можно ли в него влезть), культурно идти по тротуарам и дорогам или шпарить напрямик через магистраль и заборы? Глобальная проблема: торопиться с риском попасть под машину или идти медленно с риском опоздать в школу? Для оценки отдельных рисков и общего риска необходима информация. Возможны три подхода: 1) Личный опыт (Чай не первый раз иду в школу и не первый раз опаздываю!); 2) Советы родителей (Ходи по пешеходным переходам, смотри под ноги и на светофоры); 3) Официальная статистика (Ежемесячно под машины попадает 6 из 100 перебегающих улицу школьников, двое из них погибают; собаки кусают 8 из ста бегущих детей и т.п.).

Уже беглый анализ показывает, что рисков много и каждый может быть оценен только приблизительно (В некоторых школах опоздавших сразу выгоняют из класса и тут уже никакой вероятности нет - все предопределено: лишение удовольствия от урока, запись в дневнике, вызов родителей, порка и т.п.). Приходится осуществлять поиск в условиях неопределенности. Выбор решения ведется в пространстве альтернатив. Как правило, из десяти возможных сценариев анализ ситуации на основе имеющейся информации позволяет выбрать два-три, в которых риск минимален. Однако, окончательный выбор стратегии базируется на интуиции решающего.

Но этот курс лекций не рассчитан на молодёжь. Предполагаемые слушатели – взрослые дяди и тёти – на своей шкуре знают, что существование в данном мире – непрерывное столкновение с опасностями, что есть настоящая необходимость адекватной оценки опасностей со стороны среды обитания и нежелательных последствий собственной деятельности. Им опасность, безопасность и риск подобно разъяснять смысла нет. Им нужны алгоритмы: покупать с утра акции, или погодить? Жениться или не жениться? Валить или сидеть?

Алгоритмы – помощники в оценке риска - есть, но кто их съест?

Нужная математика, в принципе, существует, но риски разные, и математика, их описывающая, разная. Всю не упомнишь. К тому же, современная математика какая-то недоделанная: множество видов рисков она не охватывает. Впрочем, страшнее другое: сложная она. Те риски, которые как-то теоретически описываются, формализуются такой математикой, пред которой пасует аспирант мехмата (доцент, впрочем, тоже). Эту математику и эти алгоритмы реализуются лишь на дюжине самых мощных в мире компьютерах. Их можно использовать в оценке риска 3-ей мировой войны, но к риску купанья в проруби применить трудно. Да и не нужно...

В данном курсе лекций мы рассмотрим способы приложения к оценке риска таких разделов математики как статистический анализ, уравнения математической физики, информатика и компьютерные науки, геометрия фракталов, теория катастроф, теория игр, некоторые разделы синергетики. Однако ограничимся изложением идей, лежащих в основе этих подходов, и выводами из них, приводящими к полезным практическим результатам в оценке риска. Глубоко вторгаться в мир лемм и теорем не будем, иначе вообще не кончим.

Естественно, мы уделим внимание математическому моделированию различных видов риска, и продемонстрируем применимость результатов моделирования к анализу и управлению риском.

Помимо теории мы займемся экспертными (субъективными) оценками риска и психологией риска. Проиллюстрируем возникающие здесь проблемы на конкретных примерах. Обсудим концепцию гомеостаза риска в приложении к запланированному (целевому) риску и приложим её к проблеме защиты от "дурака" и от "специалиста". Затем перейдем к оценке риска машин (станков, автомобилей, самолетов и др.), заводов (в первую очередь химических и ядерной индустрии), электростанций (тепловых и атомных), транспорта, жилых помещений и много чего другого. Серьезное внимание будет уделено причинам аварий, методам их предотвращения и ликвидации последствий.

С практической точки зрения нас будет интересовать вероятность возникновения неблагоприятной ситуации при реализации рутинных событий (например, крушение поезда, авария на заводе, разрушительное землетрясение), стратегия игры на бирже и предсказание будущей цены акций, распространение по среде обитания токсина при аварии или эпидемии болезни (включая описание последствий), риски отдельных вариантов логистики. Приведем способы исследования проблем безопасности и риска, методы обработки результатов этих исследований и попытаемся дать более-менее внятное теоретическое объяснение наблюдаемых явлений, с целью прогнозирования будущих рисков.

Значительная часть курса лекций носит иллюстративный характер. Здесь описаны многочисленные случаи риска военных, путешественников, спортсменов, моряков, летчиков, автомобилистов, химиков, политиков и много кого ещё. Интересно послушать рассказы людей большого риска, доживших до седин. Но, для коллекции, приведём и риски обывателя. Тоже бывают интересными...

Надеюсь, слушатели смогут преодолеть весь курс и надеюсь, что это пойдёт им на пользу.

Однако, теория – теорией, мировой опыт – мировой опыт, но принимать решение надо самим, и без использования математических теорем и сверхбыстрых компьютеров.

Ориентироваться придется на собственный уровень допустимого риска. Да, логика подсказывает, что риск надо уменьшить до возможно низкого уровня, или хотя бы – оптимального. Но! *Кто не рискует, тот не пьет шампанское!* А шампанского хочу. *Риск – благородное дело!* Я хочу рискнуть и буду рисковать, не смотря ни на какие дурные последствия. Адреналина хочу!

Всё это известно, вспомните "Пир во время чумы" А.С.Пушкина:

Председатель (поёт)
Есть упоение в бою,
И бездны мрачной на краю,
И в разъяренном океане,
Средь грозных волн и бурной тьмы,
И в аравийском урагане,
И в дуновении Чумы.
Все, все, что гибелью грозит,
Для сердца смертного таит
Неизъяснимы наслажденья-
Бессмертья, может быть залог!
И счастлив тот, кто средь волненья
Их обретать и ведать мог.
Итак, - хвала тебе, Чума!
Нам не страшна могилы тьма,
Нас не смутит твое призванье!
Бокалы пеним дружно мы
И девы-розы пьем дыханье, -
Быть может... полное Чумы!
Священник:
Безбожный пир, безбожные безумцы!

По одному мнению - игра со смертью - залог бессмертья (риск - благородное дело), по другому - безбожное безумие. Именно люди риска сделали великие открытия: обнаружили Австралию с Новой Гвинеей, определили вкус цианистого калия, нашли критическую массу плутония. Но и именно люди риска покоряли другие народы, устраивали революции, проигрывались в карты, пуская по-миру собственных детей. Да мало ли ещё каких гадостей натворили эти самые любители риска?! Впрочем, многие не могли поступать иначе. Склонность к риску передали им предки. Удалось даже выделить ген риска, избыток которого заставляет человека пускаться на всякие авантюры или заниматься работой с повседневным риском.

Странно, но люди риска обычно пользуются уважением общества. Человек в футляре - чеховский герой - следовал всем канонам управления риском, но нам он глубоко несимпатичен.

Будь я проклят, если когда кого призову отказаться от риска.

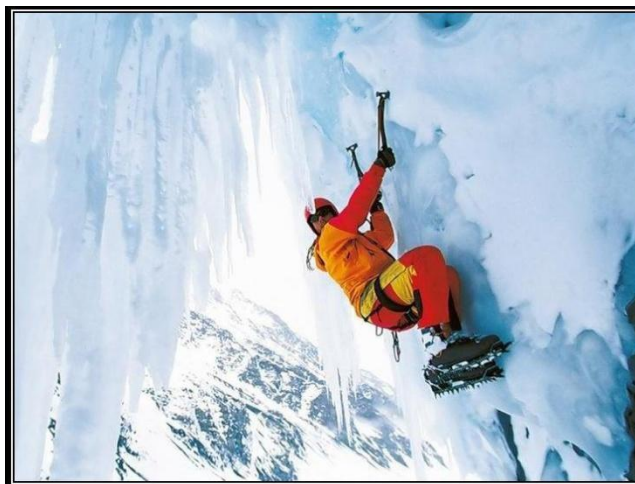
В данном курсе лекций развивается концепция оптимального риска. Здесь мы полагаемся на мнение авторитета, несомненно, разбиравшегося в обсуждаемой проблеме. Полководец А.В.Суворов говорил: - *Риск – благородное дело, но рисковать надо с умом!* Если он есть, конечно.

Для выживания в трудные времена нужна парадигма. Посмотрим, полезна ли в борьбе с опасностями риск-парадигма. Позволит ли она сохранить нас самих и среду обитания.

Только помните, ребята, что никакая теория, никакой чужой опыт, не избавит вас от собственного риска и его дурных последствий.

В анализе и управлении риском главное – интуиция, настрой, кураж, если хотите!

Научить этому нельзя.



Лекция 1. ОПАСНОСТЬ, БЕЗОПАСНОСТЬ И РИСК

*Без умолку безумная девица
Кричала – ясно вижу Трою, павшей в прах,
Но ясновидцев, впрочем, как и очевидцев,
Во все века сжигали люди на кострах
В. Высоцкий*

Касандра – предсказатель несчастий - редкий и потому ценный пример адекватно планируемого риска. Увы! Никто ей не верил, и чтобы не возникала, её сожгли. Народу казалось – правильно сделали: *Своих не стращай, а наши и так не боятся*. Однако потом пришлось пожалеть.

С опасностью и риском надо обращаться осторожно.

Опасность нас подстерегает на каждом шагу.

Опасность – это начавшееся или возможное неблагоприятное воздействие на человека и его окружающую среду вредных факторов различного происхождения: вероятность возникновения неблагоприятных событий, угрожающих жизни, здоровью, имуществу человека, его правам и интересам.

Опаска – осторожность в предвидении чего-нибудь нежелательного, опасности. Действовать с опаской.

Опасливый – действующий с опаской, настороженный, недоверчивый. Опасливые шаги. Опасливый взгляд.

Слово "опасность" происходит от слова "пасу", стадо пасти уметь надо, и не только баранов. Есть пастухи, а есть и пастыри...

Если определять коротко, то опасность - вероятность того, что может произойти какое-то нежелательное событие.

Аксиома о потенциальной опасности: Ни в одном виде деятельности невозможно достичь абсолютной безопасности. Следовательно - любая деятельность потенциально опасна.

Опасности и, следовательно, риски являются неотъемлемой частью жизни каждого человека, всего человечества и природы в целом. Их нужно уметь предвидеть, с тем, чтобы вовремя обнаружить опасность, оценить её величину, предсказать вероятность неблагоприятного развития событий и принять все меры для устранения негативных последствий.

Проблема в том, что любая деятельность опасна; бездеятельность, впрочем, тоже.

Источниками опасности могут быть землетрясения, наводнения, метеориты, наступление ледникового периода, гололед, сосульки, война, конфликт, дворовый бандит Вася, моё и чужое авто, поезд, самолёт, корабль, самокат, шум, ионизирующие излучения, теща, собственные и чужие дети, токсины и радионуклиды. И даже голуби.

Опасность способна вызвать у нас усталость, дискомфорт, стресс, болезнь, травму и смерть, а также медвежью болезнь: *трус умирает дважды*.

Источники опасности бывают природными, техногенными, политическими, семейными, генетическими. Их можно подразделить на физические, химические, физиологические и психофизиологические. Как правило, они комбинированные.

Опасности характеризуют по типам, по величине отрицательных последствий (например, число возможных заражений и смертей от СПИДа), по распределению их в пространстве и эволюции во времени. Известны инженерный, экспертный, социологический, регистрационный,

органолептический. Эффективным методом иногда оказывается метод слухов и сплетен: *одна баба сказала*.

Риск – количественная мера опасности.

Риск – 1) возможная опасность; 2) ситуативная характеристика деятельности, состоящая в неопределенности ее исхода и возможных неблагоприятных последствий в случае неуспеха.

Рискованье, риск – отвага, смелость, решимость: предприимчивость, действие наавось, наудачу. Риск – благородное дело. Нет дела без риска. Риск пополам: барыши и убытки.

Рискователь – отважный человек.

Рисковать – пускаться наудачу, на неверное дело, наудалую, идти на авось, делать что-либо без верного расчета, подвергаться случайности, действовать смело. Рисковать что или чем, подвергаться чему, известной опасности, превратности, неудаче. Рискнуть, да и закататься! Не рискуя не добудешь. Дело-то рискованное, сомнительное, опасное.

Запланированный (целевой) риск - уровень риска, который личность считает допустимым для получения максимально возможных выгод от своей деятельности.

Замечание. Понятие риска, как меры опасности, известно с глубокой древности. Правда, определяли не столько существительное «риск», сколько глагол «рисковать». Латинское слово *risicare* означает плавание среди скал и рифов. Опасное, видать, было дело. Отсюда: рисковать - подвергать себя потенциальным потерям. Обычно акцент делается на том, что риск - дело отважных людей, склонных к поиску приключений. К рискованным видам деятельности относят летные испытания, мотоциклетные гонки, работу космонавтов и полярников, альпинизм и горные лыжи, азартные игры и т.п. Можно подумать, что обычный человек, не склонный огибать земной шар на яхте-одиночке и ведущий тихую жизнь в кругу семьи, в риске не замечен. Это, конечно, не так! Мы рискуем на каждом шагу: когда едем в общественном транспорте, переходим улицу, женимся, рождаем детей, едим и пьем, двигаем мебель в квартире или возделываем приусадебный участок. Нашей жизни угрожают молнии, сосульки, гололед, соседний хим.комбинат, шумящий и воняющий транспорт, теща, Дума и правительство. Во многих регионах к ним присоединяются вулканы, землетрясения, тайфуны, наводнения и другие стихийные бедствия. Поэтому оценку и управление риском следует отнести к повседневным заботам каждого человека и общества в целом.

Риск можно определить как вероятность неблагоприятного развития событий с плохим концом: смертью, травмой, болезнью, неважным самочувствием, дискомфортом, испорченным настроением. Анализировать риск – значит обнаружить все реальные опасности, оценить вероятность их появления, рассчитать возможные последствия и суммарный ущерб от всей совокупности потенциальных опасностей. Управление риском означает попытку избежать каких-то опасностей или сведение последствий каких-либо видов деятельности к минимальному ущербу.

Раз есть опасность, и она нам не нравится (*есть опасности, которые я очень люблю, прыжки с парашюта, к примеру*), то нужно принять меру по её уменьшению или устранению (*одно дело выпрыгнуть из самолета с парашютом, другое – без него*). Порою хочется безопасности, причём хорошо, когда безопасность – это отсутствие опасности.

Безопасность – состояние, при котором не угрожает опасность, есть защита от опасности.

Безопасность – такое состояние сложной системы, когда действие внешних и внутренних факторов не приводит к ухудшению системы или к невозможности её функционирования и развития.

Безопасность человека – такое состояние человека, когда действие внешних и внутренних факторов не приводит к смерти, ухудшению функционирования и развития организма, сознания, психики и человека в целом, и не препятствуют достижению определенных желательных для человека целей.



В триаде опасность-риск-безопасность важнейший компонент - это риск, ибо на нем строятся количественные оценки. Поэтому займемся им подробнее.

Рис. 1. Международный символ биологической опасности.

Для оценки отдельных рисков и общего риска необходима информация. Возможны три подхода: 1) Личный опыт; 2) Информация от посторонних или из СМИ; 3) Официальная статистика. Рисков много, величину каждого можно измерить, но только примерно. Существуют ситуации, когда риск определяется точно, но они редки. Обычно можно оценить риски, выстроив их по ранжиру и обратить внимание на наиболее серьезные.

Мы не боремся со всеми встреченными рисками. Цель управления риском – подавление нежелательного риска, не затрагивая желательные. Из-за вероятностного характера риска, стратегия управления им сводится к поиску в условиях неопределенности. Выбор решения ведётся в пространстве альтернатив. (*Свобода - пространство доступных альтернатив*). Как правило, из десяти возможных сценариев анализ ситуации на основе имеющейся информации позволяет выбрать два, в которых риск минимален. Однако, окончательный выбор стратегии поведения базируется на интуиции решающего. Анализ риска, выработка стратегии заканчивается принятием решения, которое подразумевает ответственность (за себя, за того парня, за всё, что встретится на пути).

Уже ребёнок знает, что опасно залезать на подоконник, совать палец в розетку городской электросети (впрочем, в нос тоже), брать в рот все встречающиеся вещества и предметы, играть со спичками, таскать кошку за хвост, играть на проезжей части улицы, приставать к родителям и т.п. В опасности этих и других действий каждый оставшийся в живых быстро убеждается на личном опыте. При этом многие (далеко не все!) понимают, что об опасности лучше подумать до начала действий. Еще лучше - учесть печальный опыт других, т.е. учиться на чужих ошибках, а не на своих.

Раз есть опасность, значит, её надо опасаться. *Опасенье – половина спасенья. Кто опасён, тот и спасён.* Опасность нужно как-то оценить и измерить. Необходимость адекватной оценки опасностей, исходящих со стороны внешнего мира и нежелательных последствий от собственной деятельности стимулировало введение понятия риска. Риск – вероятность неблагоприятного развития событий с плохим концом: смертью, травмой, болезнью, неважным самочувствием, дискомфортом. Анализировать риск – значит обнаружить все реальные опасности, оценить вероятность их появления, рассчитать возможные последствия и ущерб от всей совокупности потенциальных угроз. Управление риском означает попытку избежать неприятностей или сведение результатов своей деятельности к минимальному ущербу.

Оценка опасности бывает объективной. Можно достаточно реалистично оценить последствия извержения вулкана для деревни на его склоне, рассчитать число сорванных крыш, в виду приближающегося тайфуна и т.п. В Институте Склифосовского с утра готовят нужное число коек для москвичей, которые пострадают в автомобильных авариях и к вечеру прибудут к ним. И редко ошибаются в количестве. Мы представляем себе риск посещения стадиона во время игр с участием Спартака. Более или менее понятно, что произойдет, если вылить кофе на клавиатуру компьютера. Понятен риск забора быть украшенным неприличными надписями, риск столба быть описанным собачкой или риск яблока быть съеденным червём. Когда мы говорим о риске, как о науке, мы имеем ввиду именно эти ситуации. Монтер, прибивший дощечку с красочным изображением черепа с костями и с надписью «*Не влезай, убьёт!*», несомненно, действует на научной основе и является менеджером риска. Но не кто рискует: лично я на столб лезть не собираюсь. Этот риск для меня точно равен нулю. Что с дощечкой, что без.

Но, с другой стороны, оценка риска и опасности дело сугубо индивидуальное. Ребенок боится входить в тёмную комнату, хотя там нет никакой опасности. Ветеран опасается ударить ногу, которую ему давно ампутировали. Мы бежим от риска попасть в ад, хотя смутно представляем себе, что это такое. *У страха глаза велики.* Человек субъективно оценивает опасность. В этом смысле риск попадает в ту же категорию ценностей, как любовь, чувство прекрасного, музыкальный слух, свобода и т.п. Здесь риск – некий фантом, который может иметь отношение к реальной опасности, а может и нет. Может страшить, а может и радовать.

Вне зависимости от того, относите ли вы риск к науке или психологии, управлять им надо. Лично я теперь (на восьмом десятке) стараюсь уменьшить риск, но вы можете его увеличивать. Для лучшего самочувствия. Никто никого не ограничивает. Хочешь сплавить в бочке по Ниагарскому водопаду? Плыви! Но даже в этом случае:

Без опасенья в путь не ходи!

а то не сможешь никому рассказать о своем подвиге. Тогда зачем он?!

Опасность и, следовательно, риск является неотъемлемой частью жизни каждого человека, всего человечества и природы в целом. Понятие риска относится к системе, включающей источник опасности и объект, на который этот источник воздействует. Такими парными системами являются, например, теплоцентральный – население, промышленные стоки в реку – водные растения, загрязнение почвы – микробы, черви, травы и т.п. Каждый, кто ещё жив, в той или иной степени ориентируется в концепции риска (те, кто не в ладу с риском – уже на том свете). Вопрос в том, достаточно ли человеку стихийного понимания риска, или он хочет овладеть строгими методиками анализа и управления риском. В управлении риском принято придерживаться концепции минимального (разумного) риска предполагающей, что избежать риска невозможно, но можно уменьшить его до приемлемого уровня. Важно понимать, что управление риском ведётся не только для того, чтобы избежать нежелательных потерь, но и для приобретения выгод.

Опасность и риск могут возникнуть по небрежности или по неумению. Последствия у таких рисков, кстати, разные: *за глупость Бог простит, а дураков бьют.* Мы далее будем говорить о целенаправленном (привычном) риске, который можно и нужно планировать. Запланированный

(целевой) риск – уровень риска, который личность считает допустимым для получения максимально возможных выгод от своей деятельности. (Синонимы: приемлемый, допустимый, предпочтительный, требуемый; заданный, целевой, таргетный риск).

Очевидно, что разные виды деятельности задают разные уровни риска. Один гражданин не способен выдержать высокий уровень риска, для другого риск – удовольствие. (*«И бывший ЗЭК – большого риска человек, сказал...»*). Есть профессии повышенного риска (лётчика-испытателя, космонавта, полярника и т.п.), есть опасные виды деятельности (азартные игры, вклады в российские коммерческие банки, грабежи), опасный спорт (мотоциклетные гонки, прыжки с парашютом, подводное плавание), отдыха или хобби (выращивание в ванне крокодилов). Есть «мирные» профессии бухгалтера, учителя, домохозяйки, в которых, оказывается, тоже есть место риску (Да порой ещё какому!). Так или иначе, но концепция гомеостаза риска как раз и предполагает, что человек в течение всей своей жизни придерживается некоторого уровня риска, на базе которого он и принимает решение, ориентируясь в пространстве альтернатив. Запланированный уровень риска и обеспечивает ему некий комфорт обитания.

Риск конкретного человека – его личное дело. Ситуация существенно меняется при переходе от бытового риска к общественному, тем более – к риску природы и планеты в целом. Здесь задача анализа и управления риском весьма сложна.

Как уже упоминалось, управление риском направлено на создание режима безопасности. Безопасность – совокупность условий, обеспечивающих минимальный уровень неблагоприятных воздействий природы и технологических процессов ее освоения на здоровье людей. Особое внимание уделяется социальной составляющей безопасности, т.к. даже мнимая угроза может приводить к усилению стресса и как результат – к повышению заболеваемости.

Риск-анализ выявляет причины возможного неблагоприятного развития событий, ранжирует их по величине вероятности, выделяя группу наиболее возможных, предсказывает последствия (как ближайшие, так и в далекой перспективе), выявляет компоненты окружающей среды, которые будут поражены в наибольшей степени или уничтожены, определяет характер и скорость распространения неблагоприятных возмущений в пространстве и времени. На первом этапе выявляется набор угроз, превосходящих допустимые пределы воздействий, определяется, когда и где они могут произойти, оцениваются их последствия. На втором этапе вырабатываются направления защитных и компенсирующих мероприятий.

Расчёт и анализ риска является тем методическим инструментом, при помощи которого потенциальная опасность может быть оценена количественно.

Управление риском представляет собой группу процедур, направленных на обоснование принятия административных решений. Сравнение и обобщение различной информации задаёт альтернативы выбора организационных мероприятий по предотвращению нежелательных последствий. Риск-анализ обеспечивает создание критериев отбора альтернатив, которые наиболее эффективны экологически, приемлемы технологически и наилучшим образом соответствуют конкретной окружающей среде. Оценка риска добавляет ещё одно измерение к выбору организационных мероприятий путём включения информации о вероятности разрушения природных систем, аварий на технических системах и возможных последствий этих событий для населения. Риск-стратегия своим конечным итогом предполагает принятие решений. При этом оценка риска даёт оценку возможных негативных последствий принятых решений и способов действий. Одновременно задаётся ответственность за принятые решения и возможные наказания за неверно принятые решения (риск управленца).

С позиции вероятностной логики понятие риск характеризуется сочетанием вероятностей: 1) вероятность возникновения неблагоприятного воздействия; 2) вероятность возникновения неблагоприятного воздействия именно данного типа и масштаба; 3) вероятность того, что данный тип воздействия вызывает определенную величину отклонений состояния субъекта от его динамического равновесия.

Существует два способа количественной оценки риска:

- Обработка экспериментальных данных
- Опрос экспертов.

Меру риска вычисляют по формуле:

$$R = \frac{\text{Число неблагоприятных событий}}{\text{Общее число событий}}$$

В этой формуле в числителе записывается число событий, неблагоприятных с точки зрения исследователя (например, число автомобильных аварий), а в знаменателе – общее число событий (число автомобилей на дороге). Число событий рассчитывают за определенный отрезок времени: за год, десятилетие, век и т.п. Если несколько опасностей возможны одновременно, то риски суммируются традиционными методами математической статистики. Вероятностные оценки не являются истиной в последней инстанции. Их следует воспринимать как приближенные оценки в среднем.

Далеко не всегда оценка риска связана с теорией вероятности. Например, смерть человека гарантирована законами природы. Никакой вероятности выжить не существует, т.е. вероятность смерти тождественно равна единице. Некоторые опасные промышленные объекты и установки проектируются с нулевой вероятностью катастрофы конкретного типа. Так, в современных ядерных энергетических реакторах невозможно возникновение неконтролируемой цепной ядерной реакции. Реактор устроен так, что любое внешнее воздействие приводит к затуханию ядерной реакции. (Неблагоприятное развитие событий по какому-то другому сценарию, не связанному с неконтролируемым ядерным процессом, естественно, возможно). Не работает вероятностный принцип и при оценке опасности человеческого фактора. Действия оператора сложного оборудования, водителя автомобиля, террориста и т.п. не подвластны вероятностным законам.

Другой подход основан на опросе экспертов, которые оценивают относительную опасность природных явлений или различных видов человеческой деятельности. Часто экспертные оценки совпадают с действительными, но бывают существенные расхождения. К экспертным оценкам обычно прибегают, когда нет достоверной статистической информации.

В подходе, основанном на опросе мнения экспертов, оценивают относительную опасность различных видов человеческой деятельности. Сравнение результатов "экспериментального" (т.е. действительно определенного по данным больниц и моргов) и "экспертного" (определенного по данным общественного мнения) подходов дано в Табл.1.

Табл. 1. Оценка рисков цивилизации общественным мнением в сравнении с действительными величинами.

Вид риска	Число смертей в год США	Приоритет			
		Действительный	Студенты	Ученые	Домохозяйки
Курение	150000	1	3	4	4
Алкоголь	100000	2	7	5	6
Автомобили	5500	3	5	3	2
Оружие	17000	4	2	1	3
Мотоциклы	3000	5	6	2	5
Плавание	3000	6	16	13	13
Поезда	1950	7	13	15	15
Строительство	1000	8	10	10	10
Охота	800	9	12	9	11
Домашнее хозяйство	200	10	15	16	16
Пожары	195	11	9	9	12
Полиция	160	12	8	7	13
Самолеты	130	13	11	14	12
АЭС	100	14	1	8	1
Коньки	18	15	14	12	14
Пестициды	0	16	4	11	8

Как видно из таблицы, в некоторых случаях экспертные оценки достаточно близко подходят к действительным (например, в оценке опасности автомобильного транспорта). Но в ряде случаев имеет место серьезное расхождение. Например, все эксперты недооценивают реальную опасность курения. Наоборот, студенты и домохозяйки существенно переоценивают опасность атомных электростанций, ставя риск от АЭС на первое место, тогда как в действительности АЭС по опасности находятся лишь на 14-том месте! Всеми экспертами недооценивается опасность ведения домашнего хозяйства. Эксперты считают домашние работы самыми безопасными, тогда как на самом деле профессия домохозяйки опаснее профессии пожарника, полицейского, атомных энергетиков и многих других. Существенную роль в неправильной оценке реальной опасности играют некомпетентные средства массовой информации.

Основное направление управлением риска связано с созданием режима безопасности.

Концепция риска предполагает следующие этапы действий:

- Анализ структуры риска и числовая оценка как отдельных компонентов риска, так и риска в целом;
- Управление риском.

Первый этап посвящен сбору информации, созданию базы данных и анализу всей совокупности информации (количественные данные, экспертные оценки и т.п.). Цель данного этапа – распознавание, измерение и характеристика угроз благосостоянию, здоровью и жизни как людей, так и других обитателей экосистемы.

При этом следует получить ответы на вопросы:

- Какие компоненты системы функционируют в нестандартном режиме?
- Каковы причины этого?
- Каковы возможные последствия?

- Насколько это вероятно?

Если на первом этапе выявляется набор угроз, превосходящих допустимые пределы воздействий, определяются когда и где они могут произойти, оцениваются их последствия, то на втором этапе вырабатываются направления защитных и компенсирующих мероприятий.

Управление риском представляет собой группу процедур, направленных на обоснование принятия административных решений. Сравнение и обобщение различной информации позволяет выбрать в пространстве альтернатив организационный тип мероприятий по предотвращению нежелательных последствий. Риск-анализ обеспечивает создание критериев отбора мер, которые наиболее эффективны экологически, приемлемы технологически и наилучшим образом соответствуют конкретной окружающей среде. Оценка риска добавляет ещё одно измерение к выбору организационных мероприятий путем включения информации о вероятности разрушения природных систем, аварий на технических системах и возможных последствий этих событий для населения.

Важным критерием измерения риска является вероятность потенциальной опасности для населения или персонала промышленного объекта при стихийном бедствии или производственной аварии. Риски здесь выражают через вероятность смерти индивида в течение года. Например, риск смерти в результате падения метеорита равен $6 \cdot 10^{-11}$ за год, т.е. человек имеет 6 шансов из миллиарда погибнуть в течение 100 лет от падения метеорита. Опасность этого события мала и не учитывается. Люди считают для себя приемлемыми гораздо более высокие риски. Так, курение 20 сигарет в день приводит к смерти с вероятностью $5 \cdot 10^{-3}$, т.е. человек имеет 5 шансов из тысячи погибнуть в течение года от курения, но многие продолжают курить. Риск при пребывании в одной комнате с курильщиком равен $1 \cdot 10^{-5}$ год. Риск при вождении мотоцикла – $2 \cdot 10^{-3}$, участия в автогонках $1,2 \cdot 10^{-3}$, управлении личным автомобилем – $1,7 \cdot 10^{-4}$, в альпинизме – $4 \cdot 10^{-5}$, рентгенодиагностике – $1 \cdot 10^{-5}$.

Известны разные виды риска.

Риск технологический – все виды пагубного влияния результатов процесса производства на здоровье человека и на природную среду, связанные с изменениями социальной и экологической среды.

Техническая безопасность – предупреждение потерь прочности, целостности, других материальных качеств систем, комплекс мер для предотвращения опасных отказов систем. Под технической безопасностью установки понимают достигаемые техническими средствами и организационными мерами её свойства, определяемые прочностью и герметичностью оборудования, сосудов и трубопроводов, надёжностью систем локализации радиоактивности, качеством систем контроля, управления и диагностики состояния, необходимые для того, чтобы при эксплуатации предупреждать возникновение и предотвращать развитие опасных состояний и отказов элементов систем, грозящих нарушением пределов и условий безопасной эксплуатации установки, а также контролировать и поддерживать работоспособность барьеров безопасности. **Техническая безопасность** обеспечивается высоким качеством всех инженерных работ, определяющих надёжность функционирования и безопасную эксплуатацию оборудования атомных энергетических установок.

Частными случаями технологического риска являются радиационный, ядерный и радионуклидные риски.

Риск радиационный – вероятность возникновения у человека или его потомства какого-либо вредного эффекта в результате облучения.

Радиационный риск – риск возникновения стохастических эффектов (смертность, заболеваемость), обусловленных воздействием ионизирующего излучения, в совокупности с величиной ущерба или последствий от них.

Радиационная безопасность – свойство предотвращать переоблучение людей и окружающей среды, система технических и организационных мер, обеспечивающая такую защищённость персонала и населения от радиационных воздействий, при которой не возникают нестохастические, соматические эффекты, а вероятность стохастических эффектов мала и считается приемлемой. Это система мер по защите персонала, населения и окружающей среды от воздействия проникающих излучений, направленная на обеспечение отсутствия неблагоприятных эффектов или вреда здоровью от облучения ионизирующими частицами людей, живых существ и элементов природы. Радиационная безопасность – состояние радиационной обстановки, обеспеченное комплексом мероприятий, ограничивающих радиационное воздействие на персонал, население и окружающую среду в соответствии с установленными нормами

Ядерная безопасность – предотвращение тяжёлых ядерных аварий, система мер для снижения вероятности аварий с повреждением ядерного топлива или переоблучением персонала.

Экологический риск – уровень вероятности возникновения неблагоприятных (опасных) последствий природных явлений, функционирования промышленности, транспорта и т.п., для жизнедеятельности людей, сохранности природных ресурсов, экосистем, исторических,

культурных и материальных ценностей. Причиной риска может быть природная катастрофа, работа производственного объекта, размещение жилищно-коммунальных, промышленных, сельскохозяйственных объектов в зонах стихийных бедствий и др.

Экологическая безопасность – совокупность условий, обеспечивающих минимальный уровень неблагоприятных воздействий природы и технологических процессов ее освоения на здоровье людей. Её рассматривают в пределах всех форм природопользования. Она касается как прямого, так и косвенного воздействия человека (глобального, регионального и локального) на окружающую среду. Особое внимание уделяется социальной составляющей безопасности, т.к. даже мнимая угроза может приводить к усилению стресса у населения и как результат – к повышению заболеваемости.

Развитие систем энергетики, химической, металлургической, нефтехимической и газовой промышленности связано со значительным возрастанием мощностей установок и аппаратов, а также с усложнением самих технологических процессов и режимов управления производством. Как следствие, наряду с развитием научно-технического прогресса в промышленности имеет место устойчивая тенденция роста числа аварий со всё более тяжёлыми экологическими, экономическими и социальными последствиями. Безопасность, таким образом, выдвигается в число основных характеристик промышленных объектов.

Потенциальная опасность в промышленности характеризуется вероятностью возникновения аварии и величиной возможного экономического, экологического или социального ущерба. Инженерные системы безопасности направлены на повышение надежности технических систем, т.е. на уменьшение вероятности возникновения аварии, а также на ограничение масштабов ее развития (защитные ограждения, термостойкие покрытия, водяные завесы и т.п.). Организационные меры безопасности: запрет на проживание вблизи предприятий, системы раннего оповещения, эвакуационные планы, укрытия, адекватная реакция технического персонала и населения, индивидуальные средства защиты и т.д. - направлены на уменьшение потенциального ущерба в результате аварии.

Концепция промышленной безопасности строится на единых принципах управления величиной риска, реализуемых по иерархической структуре (цех, завод, промзона, район, город, область) с оптимальным для каждого уровня использованием различных типовых методов и процедур (технических, организационных, социально-психологических). Они должны выбираться с учетом специфики данного объекта, вида и содержания опасности на этом и соседнем объектах, а также общего уровня опасности жизни на данной территории.

Последовательность операций по анализу риска обычно следующая:

1. Обоснование целей и задач оценки и анализа риска
2. Анализ технологической специфики объекта. Идентификация потенциальных опасностей и классификация нежелательных событий, способных привести к нерегламентированным выбросам опасных веществ или скоротечным выделением энергии.
3. Определение частоты возникновения нежелательных событий
4. Выделение характерных особенностей, определение интенсивностей, общих количеств и продолжительности выбросов опасных веществ или выделений энергии в окружающее пространство для всего спектра нежелательных событий.
5. Определение критериев поражения, а также форм или допустимых уровней разового или систематического негативного воздействия различных источников на окружающую среду. Выделение групп населения повышенного риска.
6. Обоснование физико-математических моделей, расчет переноса и распространения, анализ возможных трансформаций исходных факторов опасности при их распространении в окружающей среде с учетом ее природно-климатической и географической специфики.
7. Построение полей потенциального риска вокруг каждого из выделенных источников опасности, в пределах которых вероятно определенное негативное воздействие на объекты.
8. Расчёт прямых и косвенных последствий негативного воздействия источников опасности на различные субъекты или группы риска с учетом их конкретного количественного и пространственно-временного распределения вокруг источников.
9. Построение локальных и интегральных (для предприятия в целом) полей риска. Исследование влияния различных факторов на уровень и пространственно-временное распределение полей риска вокруг источников токсичных веществ, излучений или тепла.
10. Оптимизация организационно-технических мероприятий по снижению риска до заданной величины.

Управление технологическим риском включает следующие мероприятия:

- выявление зон повышенной экологической опасности и проведение инвентаризации предприятий и сооружений, значительно загрязняющих окружающую среду, опасных для природы и человека в случае пожара, взрыва, аварийного выброса химических или радиоактивных веществ;
- разработка и осуществление системы мер по максимальному снижению степени риска возникновения экологически опасных ситуаций и аварий на химических производствах, в ядерной

энергетике, при континентальной или шельфовой добыче нефти и газа, на хранилищах и средствах транспорта горючих, радиоактивных и токсичных веществ;

- разработка программы поэтапной замены экологически опасных, устаревших производств и технологий на новые, более совершенные и экологически безопасные;

- создание эффективной системы производства, потребления и захоронения токсичных, пожароопасных, взрывчатых и радиоактивных продуктов и веществ с целью исключения или минимизации их перевозок;

- ужесточение соблюдения мер безопасности при перевозке взрывоопасных, токсичных и легковоспламеняющихся веществ железнодорожным, водным, автомобильным и воздушным транспортом;

- создание на всех потенциально опасных для жизнедеятельности населения и состояния окружающей среды объектах автоматизированных систем экстренного обнаружения поступления загрязняющих веществ в окружающую среду, с оснащением их средствами контроля и диагностики;

- разработка региональных и локальных схем оповещения населения о возникающих опасных экологических ситуациях, мерах борьбы с ними и ликвидации их последствий;

- при экологическом обосновании размещения индустриальных объектов необходимо предусмотреть мероприятия и последовательности действий в случае возникновения аварии;

- при экологической экспертизе проектов особое внимание обращать на раздел, посвященный риску аварий, мерам их предупреждения и, в случае необходимости, их ликвидации.

До недавнего времени существовало глубокое убеждение, что разрабатываемые технические системы безопасности должны быть направлены на то, чтобы полностью исключить, предотвратить или, по крайней мере, локализовать наиболее опасные воздействия, вызванные максимально возможной проектной аварией. Поэтому основное внимание было направлено на то, чтобы обезопасить персонал предприятия и население, проживающее вблизи него, именно от такого типа аварий. Более глубокое изучение этой проблемы привело к осознанию необходимости рассматривать не только худшие случаи (т.е. крайне редкие катастрофы), но и часто повторяющиеся аварии меньшего масштаба, суммарный ущерб от которых может быть даже выше, чем от катастрофических аварий.

Промышленное предприятие опасно для окружающей среды не только в случае катастрофы или аварии. Химические, металлургические, горно-обогатительные, нефтехимические, газоперерабатывающие, энергетические предприятия наносят определенный вред окружающей среде и при штатной эксплуатации. Любой завод - открытая система и полностью изолировать его от окружающей среды невозможно. Промышленный, сельскохозяйственный или коммунально-бытовой объект, рудник, завод по переработке бытовых отходов, свалка, аэродром, железные и автомобильные дороги несмотря на наличие очистных сооружений выбрасывает токсичные газы, спускает ядовитые стоки, создаёт радиационные поля, шумовой фон, увеличивает температуру естественного водоема, способствуя его "цветению", падению содержания кислорода в воде и гибели рыбы.

Начнём с опасности выброса химического (например, токсина или радионуклида) вещества в атмосферу.

В этом случае опасность – это способность химического соединения наносить вред организму и/или относительная токсичность вещества или смеси веществ. Идентификация опасности – процесс установления причинной связи между экспозицией химического вещества и частотой развития и/или тяжестью неблагоприятных эффектов на здоровье человека.

Задача идентификации опасности включает следующие этапы:

- Выявление всех источников загрязнения окружающей среды и возможного воздействия на человека, растения или животных.

- Идентификация всех загрязняющих веществ.

- Характеристика потенциальных вредных эффектов химических веществ и оценка возможности вредных биологических эффектах.

- Определение возможных маршрутов экспозиции.

- Выявление приоритетных химических соединений, маршрутов их воздействия (включая загрязненные среды и пути поступления химических веществ в организм человека).

- Установление тех вредных эффектов, которые могут быть вызваны токсичными веществами при вероятных маршрутах воздействия, продолжительности экспозиции (острые, хронические, пожизненные) и путях их поступления в организм человека.

- Оценка полноты и достоверности имеющихся данных об уровнях загрязнения различных объектов окружающей среды, определение задач по дополнительному сбору информации о фактических и/или моделируемых концентрациях химических веществ в различных средах.

- Оценка наличия сведений о количественных критериях, необходимых для последующего анализа риска для здоровья (дозы и концентрации, канцерогенность).

– Окончательная корректировка плана проведения исследований по оценке риска, а также установление неопределенностей, способных повлиять на полноту и достоверность окончательных заключений и рекомендаций.

Последовательные этапы анализа и управления интегрированным экологическим риском рассмотрим на примере газообразных химических токсинов. Общая схема цепочки анализа риска выглядит так:

ИСТОЧНИК ⇒ ДИСПЕРСИЯ ⇒ ЭКСПОЗИЦИЯ ⇒ ДОЗА ⇒ РИСК

Остановимся на каждом этапе более подробно.

Анализ риска начинается с идентификации опасности: (например, не вошли ли мы в контакт с токсичным веществом? И если вошли, то где его источник? Как от функционирует?)

ИСТОЧНИК. Известны различные виды источников токсичных веществ. Это могут быть химические, металлургические и биотехнологические заводы, газо- и нефтеперерабатывающие предприятия, атомные и тепловые электростанции, свалки, бензозаправки, автотранспорт, аэродромы, залежи руд, горно-обогатительные комбинаты, животноводческие фермы и др.

Управлением риском мы должны начать с ответа на вопросы:

- Опасно ли вещество, накопленное в источнике?
- Насколько оно токсично?
- Каковы его запасы в источнике?
- Насколько легко оно может покинуть источник?

ДИСПЕРСИЯ. Даже высокотоксичное вещество не опасно для человека и окружающей среды, если оно надежно замуровано и не может далеко продвигаться от источника. Однако, если источник открытый, вещество начинает его покидать и распространяться в окружающей среде (диспергироваться в ней). При анализе диффузионного процесса необходимо ответить на следующие вопросы:

- С какой скоростью будет распространяться в окружающей среде токсичное вещество и как далеко способно оно удалиться от источника за время своей жизни?
- Какова скорость уменьшения концентрации токсина в источнике?
- По каким путям, по какому механизму и с какой скоростью осуществляется миграция токсина в окружающей среде? Какова скорость увеличения концентрации токсина в среде обитания?
- Способно ли вещество накапливаться в среде? В каких именно компонентах (растения, животные, человек, вода, почва и т.п.)? Какие достижимы концентрации в критических органах?
- Способен ли токсин к химическим превращениям во время миграции в окружающей среде? В какие реакции он вступает, и какова их кинетика? Трансформируется ли он в более опасные вещества или разрушается?

ЭКСПОЗИЦИЯ. Рано или поздно, но токсин достигает живого существа и вступает с ним в контакт. Сразу возникают вопросы:

- Какой организм вступил в контакт с токсином?
- Как именно, как долго и часто вступает организм в контакт с токсином?
- Накапливается ли токсин или быстро выводится из организма? Какова скорость вывода токсина из организма?
- Где именно (в каком критическом органе) накапливается токсин?
- Если токсинов несколько, то возможен ли синергизм от их совместного воздействия?

ДОЗА. Вещество, попавшее в организм, распространяется по нему и начинает отрицательно воздействовать на функционирование его систем. Суммарный эффект воздействия и определяет дозу. Здесь следует ответить на такие вопросы, как

- Какова концентрация токсина в организме?
- Как долго он находится в организме или в критическом органе?
- Какова его токсичность

РИСК. Риск определяется вероятностью возникновения негативных последствий для организма из-за контакта с токсином. Вопросы:

- Насколько хорошо организм способен сопротивляться негативным последствиям действия токсина (например, каково состояние иммунной системы организма)?
- К каким последствиям приводит контакт организма с токсином (болезни, смерть)?
- Каковы последствия для экосистемы в целом?

Оценку опасности со стороны токсинов химической природы следует начинать с качественного и количественного анализа веществ, накопившихся в источнике и готовых его покинуть. Качественный анализ показывает, какие именно вещества имеются в источнике. Об их токсичности можно судить по Справочнику предельнодопустимых концентраций. В нем степень токсичности вещества выражается как концентрация его в воздухе или питьевой воде, безопасная для человека. Чем ниже величина в справочнике, тем опаснее вещество

Количественный анализ показывает, каковы запасы токсина в источнике. Естественно, что чем выше количество токсина, тем опаснее источник.

Однако, определив какие и в каких количествах находятся вещества в источнике, мы еще не сможем оценить истинную опасность источника. Важнейшим параметром является степень открытости источника. Степень открытости источника показывает, какими путями и как легко токсин способен покинуть источник и переходить в среду обитания. Степень открытости источника зависит от физико-химических свойств, как самого токсина, так и остальных веществ в источнике. Если токсин представляет собой газ, пар или легко испаряющуюся жидкость, то ему легче покинуть источник, чем, например, токсичному тяжёлому металлу.

Открытость системы в значительной мере определяется тем, в какой химической форме пребывает токсин. Например, если экологическая служба объявляет, что в донных осадках реки, протекающей через ваш город, обнаружены отложения ртути, то это мало что значит. Если ртуть находится в виде достаточно хорошо растворимых хлоридов, то тогда она опасна, т.к. может перейти в воду, накопиться в обитающих в реке рыбах и, в конце концов, попасть к человеку. Если же ртуть находится в виде труднорастворимых сульфидов, то она столетиями будет залегать на дне (закрытый источник) и опасности для населения представлять не будет. Поэтому, когда речь идет о токсичном тяжёлом металле информации об его концентрации совершенно недостаточно: для оценки реальной опасности нужно знать в какой химической форме он находится, и какова степень открытости системы (степень пористости вмещающей породы, плотность породы, возможность контакта с проточной водой и др. факторы).

Если аварийная ситуация возникла из-за выброса токсина из трубы какого-то предприятия, то для характеристики источника используются такие параметры, как тип выброшенных веществ, их концентрации, температура, интенсивность и объем выброса, высота и диаметр трубы, продолжительность выброса, координаты трубы. Если выбросы происходят из нескольких труб, то необходимы знания о координатах всех источников.

Важное значение имеет идентификация токсина и правильная оценка его опасности для людей, животных или растений. При наличии нескольких химических веществ следует выделить из них наиболее опасный. Критериями приоритетности являются:

- количество вещества, поступающее в окружающую среду;
- персистентность, характеризующаяся временем полусуществования химического вещества в объектах окружающей среды (в случае радиоактивного вещества – период его полураспада); к персистентным относят химические соединения с периодом полусуществования более 50 дней;
- биоаккумуляция, отражающая способность вещества переходить из окружающей среды в биообъекты (например, водные организмы); к биоаккумулирующим относят химические соединения с коэффициентом биоаккумуляции для рыб более 500, а также вещества, у которых логарифм коэффициента распределения октанол/вода превышает 4,0.

***Персистентность** (упорствовать) — продолжительность сохранения ксенобиотиком биологической активности в окружающей среде или её отдельных объектах- в почве, атмосфере, гидросфере, растениях, тканях и т.д. Характеризуется периодом полураспада вещества. Персистентность показывает степень устойчивости ксенобиотика к процессам разложения и трансформации. Наряду с ПДК и токсичностью является критерием вредного воздействия вещества.*

Учитывается способность вещества к межсредовому распределению и транспорту, миграции из одной среды в другие среды, а также возможность одновременного загрязнения нескольких сред. При анализе токсичности обращают внимание на вред вещества для здоровья человека, включая отдаленные и необратимые эффекты, во вторую очередь – на токсичность для дикой природы (водные и наземные животные, птицы и растения). Загрязняющие природу вещества могут быть вредными и с другой точки зрения, например, нарушать химические процессы в атмосфере, изменять реакцию среды (рН), нарушать прозрачность атмосферы, вызывать цветение водоемов и др.

Дисперсия определяется мощностью источника (т.е. величиной потока токсина в среду), скоростью распространения его в окружающей среде и физико-химическими процессами в среде, происходящими с участием токсинов. Чем интенсивнее работает источник с ограниченным запасом токсина, тем скорее он кончит функционировать, но тем больше токсина попадет в среду обитания.

Распространение некоторого вещества в окружающей среде определяется законами диффузии. Если источник токсина (например, фабричная труба) находится на некотором расстоянии от приёмника, то величина потока токсина пропорциональна разности его концентраций в источнике и приёмнике, площади входной поверхности приёмника и обратнопропорциональна расстоянию от источника до приёмника. Связь между разностью концентраций и потоком задаётся размерным множителем, который называется коэффициентом диффузии. Чем выше значение коэффициента диффузии, тем выше поток вещества и тем быстрее токсин проходит свой путь от источника к приёмнику. Токсин довольно быстро распространяется в атмосфере, значительно медленнее мигрирует по воде и очень медленно в почве и донных осадках (только в высокопористых средах возможна заметная диффузия). Количество токсина, попавшее в приемник, прямо пропорционально времени функционирования источника.

Различают два режима диффузии: стационарный и нестационарный. В стационарном режиме существует установившийся поток (работает постоянный источник токсина, например, дымящая труба тепловой электростанции). В нестационарном режиме (например, в случае выброса токсина при аварии на заводе) концентрация токсина изменяется во времени: какое-то время токсина еще нет в приемнике (Требуется время на прохождение диффузионной волны. "Время запаздывания" прямопропорционально квадрату расстояния от источника до приемника и обратнопропорционально величине коэффициента диффузии), затем концентрация токсина начинает расти, достигает максимума, после чего начинает падать (если источник токсина прекратил свою деятельность), и, в конце концов, его концентрация в приёмнике достигает фонового уровня.

Согласно традиционной теории миграции, фронт диффузанта симметрично распространяется вокруг источника. Если токсин осаждается дождем или снегом, то линии его одинаковой концентрации в почве представляют собой изоконцентрические окружности с центром в источнике. Однако, если дует ветер, то возникает преимущественное направление миграции токсина. В случае бокового сноса (адвекции) изоконцентрационные линии токсина будет иметь вид вытянутого эллипса, и облако токсина может накрыть достаточно далеко отстоящий от завода населенный пункт. Направление главной оси эллипса определяется Розой Ветров для данной местности. При выборе места строительства опасного предприятия следует по многолетним метеорологическим наблюдениям определить основные сезонные направления ветров и расположить предприятие таким образом, чтобы ветра приходили сначала в населенный пункт, а затем на завод, но не наоборот.

Многие токсины устойчивы к внешним воздействиям и в ходе миграции не изменяются. Другие (например, хлор) по ходу своего движения в воздухе или в воде вступают в многочисленные реакции со встречающимися в окружающей среде веществами. В результате исходный токсин исчезает, но вместо него возникает другой, иногда ещё более сильный токсин. В ряде случаев имеет место целая цепочка подобных превращений (каждое такое превращение идёт со своей скоростью и имеет собственную температурную зависимость), поэтому прогноз распространения опасности превращается в серьёзную проблему. Наличие химических реакций может привести к новому эффекту - возникновению автоволновых колебаний.

В ходе миграции токсин может адсорбироваться на встречающихся на его пути природных объектах. Например, тяжёлые металлы, путешествующие на аэрозолях, адсорбируются поверхностью листьев или хвои и выводятся из миграционного процесса. При опадении листьев, тяжёлые металлы оказываются в почве. Аналогично, вещества, растворенные в воде, при фильтрации сквозь песок или гравий, адсорбируются последними, и вода очищается. Прекрасным природным адсорбентом является чернозём. Процесс адсорбции увеличивает время прохождения токсина от источника до приёмника и уменьшает концентрацию токсина в самом приемнике. Однако на своём транспортном пути токсин может концентрироваться в некоторых природных объектах, образуя вторичные залежи. Поэтому вместо импульсного точечного источника техногенного происхождения мы получаем распространённые в природе источники токсина длительного действия. Борьба с негативным влиянием такого источника может оказаться намного сложнее, чем с первичным.

Ситуация усложняется, когда в регионе функционируют несколько заводов, каждый из которых выбрасывает свою группу токсинов. Один завод проектируется независимо от другого и руководствуется требованиями санитарного паспорта, по которому его выбросы не должны превышать предельно допустимое значение. Однако, токсины, поступившие от разных заводов, могут встретиться в облаке и здесь во влажной атмосфере под действием солнечного ультрафиолета вступить друг с другом в химические реакции. В результате может возникнуть новый токсин, предельная концентрация которого в тысячи раз ниже предельно допустимой концентрации любого "планового" токсина. Возникает вопрос: кто отвечает за производство этого "внепланового" супертоксина и за факт превышения его ПДК в среде обитания? Как бороться с его природным производством? Еще опаснее если в реакции, происходящие в окружающей среде, начинают вмешиваться микробиологические процессы. Микробы, планктон, грибки и лишайники с одной стороны способны перерабатывать токсин в более токсичную и более подвижную форму, и сами трансформироваться (например, мутировать под действием токсина) в новый вид, более болезнетворный.

При расчёте распространения выброса загрязнителей необходимо учитывать такие параметры, как скорость ветра (на уровне почвы, на высоте 10 м на высоте трубы), азимут ветра (роза ветров), инсоляция, облачность, температура воздуха индекс устойчивости температуры воздуха, параметр Кариолиса ($=0.000093 \text{ 1/с}$ на широте 40 град), тип и интенсивность осадков, класс устойчивости атмосферы, турбулентность атмосферы, высотные градиенты для ветра и температуры, высота инверсионного слоя, тип рельефа, средняя неровность рельефа, тип растительности, тип городской застройки, расстояние от источника, расстояние от оси шлейфа. Метеоданные поступают со станций гидромета, их надёжность зависит от плотности этих станций на исследуемой территории. В итоге расчёта дисперсии определяют характер пространственного

распределение концентрационного поля токсина и эволюцию его во времени и пространстве. В частности определяют значения концентрации токсина в точке, для которой проводится оценка экологического риска (точка воздействия). После прохождения волны токсина измеряется количество загрязнителя, осевшего на земле, траве, листьях деревьев, попавшего в водоему (в первую очередь – в колодца с питьевой водой). Строится карта загрязнений и определяется характер её изменения в пространстве и времени. Проводится ранжировка территорий по степени загрязненности, и выявляются «горячие точки».

Для адекватного расчета риска от газообразного токсина для конкретного организма необходимо учесть характер экспозиции этого организма в атмосфере токсина. Количество токсина в организме определяется скоростью его поступления в организм, которая зависит от концентрации загрязнителя в воздухе (эта концентрация может изменяться во времени, как из-за дисперсии токсина, так и из-за перемещения объекта исследования, покидающего загрязненную зону), от объёма вдыхаемого в единицу времени воздуха, от особенности абсорбции и отложения газов или аэрозолей в органах дыхания. Радиационная доза и последствия облучения зависят от времени пребывания радиоактивного изотопа в зоне экспозиции и от скорости его вывода из организма (определяется периодом полураспада радионуклида и периодом полувыведения меченого соединения). Следует также учесть тип экспонированного объекта: человек (дети, взрослые, рабочие, служащие, визитеры), животные, растения и т.п., анатомо-физиологические параметры мишени (например, наличие критического органа). Одновременно проводят ранжировку объектов по возможной силе отрицательного воздействия токсина.

Различают дозу однократного, хронического и пожизненного воздействия.

Основные этапы анализа экспозиции приведены в Табл. 2.

Табл.2 Основные элементы анализа экспозиции.

Элемент	Характеристика
Агент(ы)	Биологические, химические, физические, один агент, множество агентов, смеси
Источник(и)	Антропогенный/неантропогенный, поверхностный/точечный, стационарный /подвижный, внутри-/вне помещения
Транспорт/накопление	Воздух, вода, почва, пыль, пищевые продукты и др.
Маршрут(ы) воздействия	Потребление загрязненной пищи, вдыхание воздуха на производстве и др.
Воздействующая концентрация	кг/кг (пищевые продукты), мг/л (вода), мкг/м ³ (воздух)
Пути поступления	Ингаляция, кожный контакт, глотание, множественные пути
Продолжительность экспозиции	Секунды, минуты, часы, дни, недели, месяцы, годы, на протяжении жизни
Частота воздействия	Постоянная, периодическая, циклическая, редкая, случайная
Экспонируемая популяция	Производственная/непроизводственная, жители/визитеры, отдельные подгруппы, индивидуумы
Географический охват	Связь с территорией/связь с источником, локальный, региональный, национальный, международный, глобальный
Период оценки	Прошлые, настоящее, будущее, тренды

Результатом анализа процесса экспозиции является расчёт дозы, т.е. количества токсина, накопившегося в организме, или прошедшего через организм в ходе воздействия.

Доза, т.е. количество токсичного вещества в организме, сама по себе мало что значит. Важно причинит ли она организму ущерб, и если причинит, то какого типа и какой тяжести, важно также не вызовет ли она эпидемию, способную нанести вред всей популяции.

В качестве примера приведём расчёт риск для человека (вычисления для любого другого компонента экосистемы проводятся аналогично).

Расчёт риска проводится корреляционно-регрессионным анализом. При этом строятся трёхмерные графики, в которых независимыми переменными являются концентрация токсина и время экспозиции, а зависимая переменная – ущерб (заболеваемость, смертность, стресс). На этом этапе важно точно определить, что понимать под ущербом здоровью. Обычно понимают смертность и онкологические заболевания, хотя в качестве критерия ущерба могут выступать любые другие показатели здоровья.

Два основных элемента риска связаны простым уравнением:

$$\text{Риск} = \text{опасность} \cdot \text{экспозиция}$$

Обычно полагают справедливыми постулаты Парацельса:

$$\text{Риск} = (\text{Токсичность}) \cdot (\text{Доза})$$

$$\text{Экспозиция} = \text{Доза}$$

Тогда

$$\text{Риск} = (\text{Токсичность}) \cdot (\text{Экспозиция})$$

Оценка риска здоровья проводится по схеме: источник→эмиссия→среда→экспозиция→человек. Различают риски от однократного поступления токсина в организм и хроническое поражение населения (например, от токсина, выбрасываемого стандартно работающим заводом).

При расчёте риска от газообразного токсина учитываются различные факторы воздействия вредного вещества на организм. Среди них:

I. Учёт величины возможного ущерба для здоровья

1-й уровень – предупреждение развития слабых вредных эффектов. Воздействие не вызывает развития явных вредных эффектов, однако возможно слабое, легко обратимое раздражающее действие на слизистые оболочки, полностью исчезающие после прекращения воздействия.

2-й уровень – предупреждение выраженных вредных эффектов: превышение данного уровня способно приводить к стойким изменениям состояния здоровья, нарушениям или даже прерыванию беременности, снижению способности осуществлять защитные действия.

3-й уровень – предупреждение развития эффектов, угрожающих жизни: превышение данного уровня может привести к смерти наиболее чувствительных индивидуумов. При увеличении продолжительности воздействия высока вероятность гибели лиц в общей популяции. После прекращения воздействия возможны стойкие или необратимые изменения состояния здоровья вследствие поражения ряда органов и систем организма.

II. Учёт специфических особенностей экспонируемой популяции.

III. Учёт продолжительности воздействия.

Расчёты риска проводят с применением модифицированного уравнения Габера

$$C \cdot n \cdot t = K$$

где n – параметр зависимости «концентрация – время», специфичный для каждого химического вещества; t – время воздействия; C – концентрация вещества; K – специфическая для каждого вещества константа.

Показатель относительной опасности:

$$H = a + b \cdot \log C$$

где H – показатель относительной опасности, усл.ед.; a , b – эмпирические коэффициенты, получаемые методом наименьших квадратов, C – концентрация химического вещества в воздухе, мг/м³.

Оценка опасности, осуществленная по спектру связей «концентрация ответ» (зависимость «тяжесть – ответ – концентрация время»), индивидуальна для каждого вещества. Каждый выделенный диапазон концентраций характеризуется эффектами определенной тяжести, возникающими в конкретных (в том числе сверхчувствительных) группах населения. Для межвременных экстраполяций используют зависимость «концентрация – время»:

$$\lg C_2 = \lg C_1 + n \cdot \lg(t_1/t_2)$$

При анализе риска населения учитываются такие факторы, как годовая статистика смертности, смертность на единицу населения, причина смерти (отдельно выделяется канцерогенный риск), половозрелая группа; заболеваемость (годовая статистика обращаемости), обращаемость на единицу населения, регистры обращаемости, детские поликлиники, скорая помощь, время, пространство, диагноз, половозрелая группа. Используются базы данных по населению, миграции, карта распределения плотности населения и медицинских учреждений, маршруты передвижения населения.

Результаты расчёта ущерба сравнивают с «фоном», выбранным за систему отсчёта. Выявляют статистически значимый ущерб от воздействия промышленного токсина по сравнению с фоновым. Проводят корреляционный анализ для поиска связанных групп факторов среды и здоровья. Методами регрессионного анализа получают количественные зависимости риска (смерти или повреждения организма) от интенсивности воздействия неблагоприятного фактора среды (например, токсина). Окончательно осуществляют расчёт дерева сценариев – вариантов развития ситуации «среда-здоровье», оптимизированных под разные управленческие решения.

Управление риском начинается с расчёта экономического эквивалента ущерба здоровью: решение принимается по схеме эффект-цена. Базовой величиной является интегральный индекс ущерба здоровью. Проводят учёт социально-экономических факторов, потерь и затрат, рассчитывают и оптимизируют неопределённости информации. На последнем этапе осуществляют выбор мер управления по критерию эффективность/стоимость.

Управленческие решения включают смену технологии, установку очистных сооружений, модернизацию противоаварийных систем, улучшение мер защиты населения, диагностики заболеваний и лечения, денежные компенсации пострадавшим и т.п.

В настоящее время имеется несколько программ для компьютерного анализа риска, связанного с поступлением в среду обитания газообразного токсина. В России наиболее известна

система обработки информации по проблеме «Среда – здоровье» *EHIPS – Environmental Health Information Processing System*.

В системе оценки риска проводятся отдельно для канцерогенов и для неканцерогенов. Результаты расчётов позволяют выйти на определение приоритетов по загрязнителям, территориям, сезонам и, таким образом, являются материалом для непосредственного применения к принятию решений по управлению риском. Оценка риска для здоровья, связанного с загрязнением окружающей сред проводится в четыре этапа: идентификация опасности, оценка экспозиции, оценка связи доза-эффект и характеристика риска. Схема оценки экспозиции включает определение типа воздействия, маршрута от источника к "приёмнику" экспозиции, факторов неопределённости, пространственной и временной координаты. Учёт токсичности загрязнителей проводится по различным видам кривой «доза-ответ».

В *EHIPS* интерпретация оценок риска проводится в терминах вида и тяжести ожидаемого ущерба для здоровья. Для канцерогенных рисков интерпретация достаточно груба: все виды раковых заболеваний суммируются. При этом методика позволяет достаточно полно учесть как токсикологические, так и эпидемиологические данные для нераковых заболеваний. Ранжировка ожидаемых эффектов для здоровья проводится по тяжести, в зависимости от уровня риска. Детализация этой информации дается по группам населения. Кривые "доза – эффект" (точнее, "концентрация – эффект"), строят по токсикологическим и эпидемиологическим данным для ряда веществ. Переход от риска к ожидаемой заболеваемости осуществляется и по кривым, полученным только из эпидемиологических данных.

Система рассчитана на 5 типов данных: выбросы, концентрации, риски, заболеваемость и смертность. Модель рассеяния позволяет оценить ожидаемые концентрации в любой точке территории и, таким образом, восполнить дефицит станций прямого мониторинга загрязнения атмосферы. В системе заложены две различные модели рассеяния: отечественная ОНД-86 и американская *ISC3ST*. Характерными для расчётных концентраций являются «горячие точки» (хвосты гистограмм), которые часто соответствуют территориям, не охваченным мониторингом. Анализ включает этапы: идентификацию опасности, оценку экспозиции, оценку связи доза-эффект и характеристику риска. Определяется тип воздействия, маршрут от источника к «приёмнику» экспозиции, факторы неопределённости, а также токсичность загрязнителей по различным видам кривой «доза-ответ». Даны принципы определения приоритетности загрязнителей по их токсичности. Раздельно рассматриваются канцерогенные и неканцерогенные эффекты.

В текущей версии основным результатом работы системы является расчет риска (односредового – только по воздуху) для здоровья населения в развёртке по времени, территориям, экспозиционным группам и другим используемым в системе переменным. Система может быть использована для решения обратных задач идентификации факторов и источников.

При оценке влияния факторов среды на здоровье населения используются следующие понятия:

I. Идентификация опасности включает источник (инвентаризация); эмиссия (объём выброса, параметры, необходимые для расчёта максимально разовых и среднегодовых концентраций); потенциально опасные факторы (абсолютно все присутствующие в окружающей среде вещества); перечень приоритетных (наиболее опасных) факторов.

II. Экспозиция: территория; население, включая чувствительные подгруппы; маршрут воздействия: источник – воспринимающая среда – транспортирующие и трансформирующие среды – воздействующая среда – точка контакта – путь поступления –экспонируемая группа населения; воздействующие дозы и концентрации с учётом выбранного маршрута экспозиции (воздействующих сред и путей поступления). Результаты моделирования концентраций (модели рассеивания); результаты моделирования межсредовых переходов (концентрации во всех воздействующих средах); данные непрямого мониторинга (максимально разовые, среднегодовые концентрации, статистическое распределение); данные прямого мониторинга (индивидуальный отбор проб); факторы экспозиции (суточная активность, потребление воздуха, воды, продуктов и др.); расчёт воздействующих доз для населения в целом и отдельных чувствительных групп; расчёт суммарных доз для всех маршрутов экспозиции, путей поступления, воздействующих сред; характеристика суммарной нагрузки.

III. Зависимость доза-ответ включает ПДК по санитарно токсическому признаку вредности; референтные концентрации (уровни минимального риска); факторы канцерогенного потенциала; параметры зависимости «доза-ответ» для неканцерогенов (риск нарушения здоровья на единицу дозы/концентрации); поражаемые органы и системы, тяжесть изменений при разных уровнях воздействия; установление этиологической связи между экспозицией и фактическими показателями состояния здоровья населения, выявление вклада изучаемого фактора в риск развития нарушений состояния здоровья.

IV. Характеристика риска использует значения рисков для отдельных факторов при разных путях воздействия из определенных сред; суммарные риски для маршрутов воздействия, путей поступления, суммарные риски для веществ с одинаковым типом вредного действия; расчет

интегрированных индексов опасности для факторов с разным типом вредного действия, например, канцерогенов и неканцерогенов; анализ распределения рисков в популяции, в особо чувствительных подгруппах, выявление сверхэкспонируемых индивидуумов; сравнение многолетней динамики рисков на данной территории; ранжирование факторов, источников загрязнения, территорий; сравнительная характеристика рисков влияния на здоровье, экологических рисков, влияния факторов на условия и качество жизни населения; определение приоритетных проблем для данной территории.

Система *EHIPS* позволяет проводить межвидовую экстраполяцию, экстраполяцию со среднего индивидуума на наиболее чувствительные подгруппы (внутривидовая экстраполяция), экстраполяцию с одного пути воздействия на другой (с учетом различий в токсичности при разных путях поступления токсина в организм), а также учитывать влияние вредного вещества на развивающийся организм (плод, новорожденный, ребенок) с переходом от более тяжелых эффектов к менее тяжёлым.

В результате работы системы *EHIPS* рассчитываются медико-биологические последствия воздействия токсинов на экосистему, отдельную особь и популяцию, что обеспечивает информацию, необходимую для принятия мер по управлению экологическим риском и выработки мер по стратегии развития конкретного типа промышленности (например, ядерной индустрии) на региональном, государственном и глобальном уровне.

Итак, рисков много: риски, угрожающие безопасности; здоровью; состоянию среды обитания; общественному благосостоянию; финансовые риски, химические, канцерогенные и т.п. В данном курсе лекций мы их последовательно рассмотрим.



Лекция 2. ГОМЕОСТАЗ РИСКА

Подстерегающие нас опасности исходят от природы, техники и человека. В данной лекции на примере риска автолюбителя рассмотрим психологию риска и влияние на число аварий на дорогах и число пострадавших особенностей менталитета населения и стремления отдельного человека к привычному уровню риска. Речь пойдет о целевом риске и о гомеостазе риска.

Сначала напомним, что такое гомеостаз.

Явления, в которых процессы постоянно и "автоматически" поддерживаются на заданном уровне, широко известны, как в природе, так и технике.

В биологии под гомеостазом (*от гомео – неподвижность, состояние; согласованное, подобное или статическое состояние дел*) понимают совокупность сложных приспособительных реакций живого организма, направленных на устранение или максимальное ограничение действия факторов внешней и внутренней среды, нарушающих относительное динамическое постоянство внутренней среды организма. Примерами являются: постоянство температуры тела, уровня кровяного давления и т.п.

Гомеостаз – процесс регулирования, который поддерживает выходные параметры близкими к целевым, путем компенсации нарушающего влияния внешних воздействий. Например, температура тела человека гомеостатически заключена в узкие пределы, несмотря на существенные изменения температуры окружающего воздуха. Гомеостаз – сохранение равновесия при происходящих изменениях. На практике гомеостаз осуществляется при наличии в системе эффективных отрицательных обратных связей.

Гомеостаз подразумевают не фиксированный и неизменный конечный результат или неизменное фиксированное состояние дел, а частный случай динамического процесса, который поддерживает выходной параметр на заданном уровне.

В технике примерами являются термостат, регулятор Уатта, автопилот и множество других устройств – технических систем автоматического регулирования. **Гомеостаз** не означает постоянства. Этим он кардинальным образом отличается от **изостаза**. В гомеостате задаётся некоторый уровень параметра (целевой параметр, например, температура, давление) и допускается некоторый интервал, в пределах которого возможно отклонение параметра от заданного уровня. Колебания параметра не некая ошибка работы системы, а её естественная составляющая, без которой состояние гомеостаза вообще невозможно. Задача оператора – задать нужный уровень параметра и обеспечить флуктуации параметра в заданных рамках (т.е. задать нижний и верхний уровни параметра, выходы, за пределы которых маловероятны или вообще невозможны). Важна и инерционность (быстродействие) системы. Управление системой основано на обратной отрицательной связи. Энергия обратной связи крайне мала по сравнению с инициируемой ею энергией, которая возбуждается в системе, идёт ли речь о техническом устройстве, организме или экосистеме.

Понятие гомеостаза можно использовать и в психологии, в частности при описании психологии риска.

Гомеостаз риска – степень рискованного поведения и величины потерь, вызванные несчастными случаями или зависящими от стиля жизни болезнями, ожидаемые за некоторый срок, которые еще не приводят к изменениям в запланированном уровне риска.

Перейдём теперь к авариям с участием машин.

Что поражает при анализе официальной статистики гибели людей на дорогах? В большинстве развитых стран смертность, вызванная катастрофами, за весь двадцатый век практически оставалась неизменной. Число погибших, рассчитанное на душу населения, несколько изменяется в разные исторические эпохи, зависит от полового состава водителей, но в

целом остаётся практически неизменным. И это несмотря на искоренение гужевого транспорта, на внедрение велосипедов, мотоциклов и автомобилей. И это несмотря на существенные технологические, законодательные, образовательные и медицинские успехи, достигнутые за тот же период.

Объяснение наблюдаемых эффектов лежит не в сфере науки или техники, а в сфере психологии риска.

Теория гомеостаза риска, ТГР, предложенная Г.Уальдом, утверждает, что в любой сфере деятельности человек допускает для себя определённый уровень риска (риск здоровью, безопасности и т.п.) с целью получения от своей деятельности желаемой выгоды (перемещение в пространстве, работа, еда, питье, отдых, спорт).

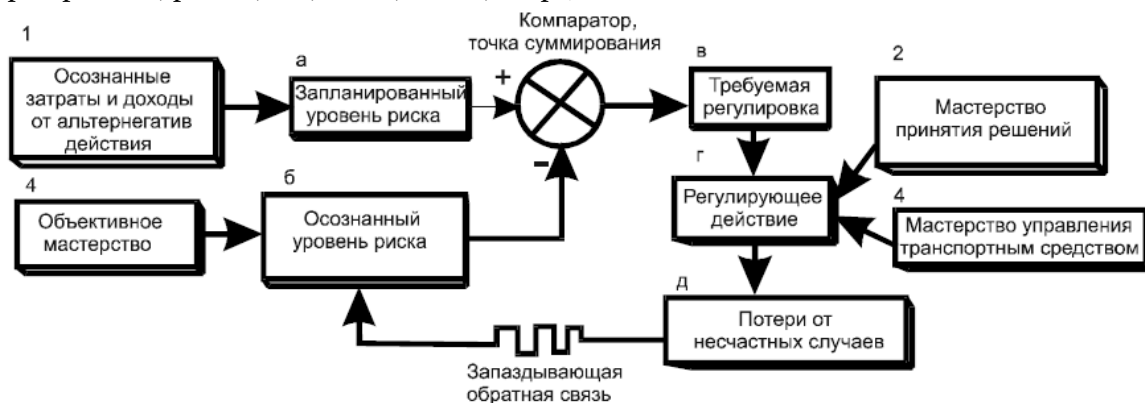


Рис. 2. Модель гомеостаза, связывающая интенсивность аварий на душу населения в данном регионе с уровнем осторожности поведения пользователя дороги, и, наоборот, с запланированным уровнем риска, как контролируемой переменной.

В любой поведенческой активности, человек руководствуется той степенью риска, которую он считает оптимальной. Он непрерывно сравнивает реальную опасность с допустимой для себя степенью риска, и пытается уменьшить разность между этими величинами. Если уровень реального риска ниже «предельно допустимого», человек меняет свои действия, чтобы увеличить риск. Оказавшись в режиме пониженного риска, и, тем более – вообще без риска – он испытывает дискомфорт и не успокоится, пока не повысит риск до комфортного уровня. Наоборот, если реальный риск выше допустимого, человек начинает действовать осторожнее. Следовательно, он выбирает свои действия так, чтобы реальный риск соответствовал допустимому в рамках менталитета индивидуума.

И травмы и личная осторожность влияют как на степень ощущаемого людьми риска, так и на их будущие действия. Учитывая свой личный опыт, человек принимает решение о своих действиях, которое и определит последующую интенсивность созданных им несчастий.

Любое действие человека приводит к возникновению объективной вероятности риска несчастного случая, болезни, а то и смерти. Суммарная активность всех членов общества за данный период времени (год или, несколько лет) определяет динамику насильственных смертей, несчастных случаев или заболеваний, вызванных особенностями образа жизни. Именно привычки населения определяют уровень безопасности на дорогах: одно дело перемещаться по дорогам Германии, и совсем другое – по дорогам России, или, скажем, Грузии. В каждой стране – свой стиль коллективного взаимодействия водителей, на автострате, отсюда и разница в числе аварий и их дурных последствий. А число светофоров и полицейских здесь вообще не важно.

В долговременной перспективе интенсивность производимых человечеством несчастий зависит от степени риска, которую население считает приемлемым.

Таким образом, теория гомеостаза риска предполагает, что динамика смертей на дорогах представляет собой регулируемый процесс с отрицательной обратной связью, в котором допустимый уровень риска оперирует как единственная контролируемая переменная. Если мы хотим уменьшить неприятности, то все усилия нужно направить на уменьшение уровня риска, приемлемого для населения. А вовсе не на улучшение качества дорог, систем безопасности автомобилей, полицейского контроля и т.п. дорогостоящих, но абсолютно бесполезных мер!

Центральный тезис теории гомеостаза риска в приложении к безопасности на дорогах гласит:

Люди изменяют своё поведение в ответ на осуществление мер по безопасности, но число погибших на дорогах (в расчёте на число участников движения за длительный период времени) будет оставаться неизменным до тех пор, пока эти меры не убедят людей изменить степень риска, которой они готовы подвергаться.

Да, строительство современной многополосной автостреды приведёт к уменьшению числа погибших, если считать на единицу длины этой магистрали. Но следует помнить, что число

смертей, рассчитанное на одного участника движения по всем дорогам страны, останется таким же или даже увеличится.

Рассмотрим следующие аргументы:

Река впадает в море через дельту.

Дельта представляет собой три одинаковых рукава.

Перекрытие двух рукавов уменьшит поток воды в море на две трети.

По всей видимости, вы отвергнете этот вывод. Это неудивительно, т.к. он очевидно неверен: вода никуда не денется – она пойдёт по оставшемуся свободным рукаву. Если есть доступные пути, поток уменьшить невозможно. Аналогично, невозможно уменьшить смертность из-за катастроф и болезней, пока все причины преждевременной смерти не будут устранены законами или технические нововведениями.

А вот это как раз невозможно!

Казалось бы, есть надежный способ сведения к нулю числа катастроф на конкретной дороге – полное закрытие этой дороги для движения любого вида транспорта. Но очевидно, что водители начнут ездить по другим дорогам, причём катастрофы мигрируют вместе с ними. Закрытие дороги – не эффективное средство.

Анализ ситуации показал, что внедрение строгих регулирующих законов, непрерывное информирование населения о конкретных опасностях, модернизация окружающей человека техногенной среды оказались не продуктивны с точки зрения улучшения здоровья и безопасности населения в ситуациях, зависящих от человеческого поведения. Способы создания эффективных мер безопасности должны базироваться на увеличении стремления человека к безопасному и здоровому образу жизни, на уменьшении его индивидуального уровня риска. Старый законодательный, образовательный и инженерный подходы нужно заменить на **мотивационный** способ предотвращения несчастных случаев и насильственной смерти.

Теория гомеостаза риска утверждает: 1. Изменение поведения водителей влияет на интенсивность катастроф (что очевидно) и, наоборот, интенсивность катастроф влияет на поведение водителей (что менее очевидно). 2. Заданный уровень риска лимитирует интенсивность катастроф.

Величина целевого риска водителей определяет интенсивность дорожных происшествий. Изменив уровень риска, можно изменить уровень катастроф. Мы можем потребовать от водителя, чтобы он жёстко придерживался собственного оптимального уровня риска. Однако, большую точность в профессиональных действиях водителя можно достигнуть лишь путём больших умственных и нервных затрат. Платой за них будет быстрое наступление психической усталости и, как следствие, появление риска совершения крупной ошибки.

Представьте себе, что вы ведёте машину по идеально прямой дороге. Манипулируя рулём, вы удерживаете автомобиль на курсе. Так как этого невозможно добиться с математической точностью, вы быстро обнаружите, что автомобиль отклоняется от цели и нужно скорректировать курс. Некоторое время спустя, вы видите новое отклонение и делаете новую коррекцию, и так далее. Большую часть времени ваш автомобиль движется к точке, расположенной или слева или справа от цели. Вы можете, конечно, попытаться уменьшить величину (амплитуду) и длительность (длину волны) ошибок наведения до абсолютного минимума, но это потребует увеличения концентрации внимания, и вы можете прозевать нечто крайне опасное. Поэтому нужно не минимизировать ошибки управления, а удерживать их в обоснованных пределах. Таким образом, лучше ошибаться, чем не ошибаться, при условии, что ошибка попадает в заданные пределы.

Вопрос: каковы причины происшествий на дорогах?

Обычно отвечают так: двигатель заело, шина лопнула, водитель плохо видит, атмосферное давление низко (или велико), дорога узка, слишком быстро (медленно) ехал, выпил много (или не опохмелился), молодой ещё (или старый), погода плохая (или хорошая), водитель – левша или с женой поругался.

Замечание. Приведём выдержки из заявлений Канадских водителей к своим фирмам автострахования:

- Я сбил человека. Он признал, что был не прав, т.к. его уже давили.
- Парень перекрыл всю дорогу; я крутил рулем, пока его не настиг.
- Пешеход понятия не имел, куда и как идти, так что я его сбил.
- Невидимый автомобиль возник из небытия, был атакован моим и уничтожен.
- Я врезался в фонарный столб, который заслонял пешеход.
- Глянув на тещу, я съехал с дороги, и соскользнул с набережной
- Я ехал к доктору лечить понос, когда прихватило; ну и попал в аварию.

И никто не помнит о психологии риска и о привычном водителю риске. А зря! В них-то все и дело.

Британский психолог Д.Тейлор обследовал 20 водителей, следующих предварительно выбранным маршрутом по окраине Лондона. Этот маршрут включал большое разнообразие дорог: переулки с магазинами, улицы пригородной жилой зоны, извилистые деревенские дороги, шоссе

и автострада. Водители были снабжены оборудованием, которое измеряло электрическое сопротивление кожного покрова. В ходе эксперимента количественно измеряли (по потоотделению) степень страха, испытываемую водителем при реакции на некоторое событие. Водитель, приближаясь к светофору и видя изменение его цвета с зеленого на жёлтый, проявляет малый эффект, но неожиданное обнаружение другого автомобиля, летящего ему в лоб, обычно производит на него большое впечатление.

В исследовании Тейлора были измерены три важные переменные для каждого из 40 различных отрезков дороги:

(а) Интенсивность катастроф, приходящаяся на автомобиль в расчёте на единицу пройденного пути. Этот параметр вычислялся делением зарегистрированного числа аварий, случившихся за последние два года, на число проехавших автомобилей, и затем делением этого отношения на длину отрезка пути, измеренную в милях. Эта переменная представляет пространственный **объективный** риск катастроф на автомобиль на милю движения по конкретному участку дороги.

(б) Интенсивность показаний датчика водителя в расчёте на милю: общая активность детектора (произведение числа и величин откликов) делённая на отрезок пути. Эта переменная, даёт пространственный **субъективный** риск катастроф на водителя на милю при движении по конкретному участку дороги.

(в) Средняя скорость движения машин на каждом отрезке пути.

Была обнаружена положительная связь между параметрами (а) и (б), указывающая на то, что водители проявляют больший субъективный риск на участках дороги, которые отмечены в полицейских отчётах, как участки, где чаще встречаются катастрофы. Очевидно, что водители в среднем чувствительны к условиям, в которых аварии встречаются и реагируют на них увеличением чувства страха. И что они делают в этих условиях? Наблюдающаяся отрицательная корреляция между катастрофами/автомобиль/ миля и средней скоростью движения автомобиля показывает, что в опасных условиях водители притормаживают, а по участкам дороги с низкой вероятностью катастроф едут быстрее.

Водителями придерживаются **стабильной во времени** степени риска при движении по разным участкам дороги. На тех участках дороги, где водители ощущают повышенный риск, они замедляют движение, и тем самым тратят больше времени на преодоление этого участка дороги, довольно долго нервничая. Напротив, там, где страх ниже, они двигаются с большей скоростью, так что нервозность на милю проявляется короткое время. Интенсивность показаний датчика (оценка субъективного риска) на **единицу времени** путешествия, проявляет относительную стабильность и не зависит от конкретного участка дороги, по которому следует водитель, а также не зависит от темпов катастроф на автомобиль на милю на этом участке дороги.

Объективный и субъективный риски, определенные не на милю пути, а на единицу времени путешествия не зависят от вариаций дорожных условий. Причина заключается в способности водителя изменять свои действия. В какой-то степени он может влиять на реальный риск (например, принимая или отвергая возможность обгона, или просто решая ехать медленнее или быстрее). Если он контролирует себя, нет причин, почему он должен хотеть большего риска на одном участке дороги, чем на другом.

Таким образом, интенсивность катастроф – саморегулирующийся процесс с обратной связью.

Рассмотрим всю совокупность пользователей дороги в данном регионе (под регионом будем понимать город, деревню, район, область или страну). Будем рассматривать интенсивность катастроф на душу населения. Учтём все случаи гибели людей в авариях, произошедших в регионе за конкретный отрезок времени (скажем, год). В качестве целевого параметра выберем запланированный уровень риска, т.е. степень риска катастроф, которую разные люди допускают на выбранный период времени (степени риска в разные времена могут быть различны). Тогда, если ожидаемая прибыль от рискованного поведения высока, а ожидаемые издержки (неприятности) относительно низки, запланированный уровень риска будет высоким. Выражение "заданный уровень риска" не следует понимать так, как будто люди стараются достигнуть некоторого уровня риска ради его самого. Целевой риск не означает риска ради риска.

Запланированный уровень риска катастроф (степень осторожности поведения водителя на дороге) определяется четырьмя факторами:

1. Ожидаемые выгоды от различных типов рискованного поведения: например, выигрыш во времени при езде с большой скоростью или удовольствие от рискованных маневров в борьбе со скукой.
2. Ожидаемая стоимость разных типов рискованного поведения: затраты на ремонт своего и чужого автомобиля, оплата лечения пострадавшим по твоей вине.
3. Ожидаемый доход от различных типов безопасного поведения: например, страховые скидки за безаварийное вождение.
4. Ожидаемые затраты при различных типах безопасного поведения: Например, использование неудобного ремня безопасности.

Чем выше значения факторов 1 и 4, тем выше запланированный уровень риска. Он будет понижаться при повышении величин факторов 2 и 3. Некоторые мотивационные факторы во всех четырех категориях по своей природе являются экономическими; другие имеют культурное, социальное или психологичное происхождение. Запланированный уровень риска вовсе не означает, что люди стремятся к успеху, рассчитывая точные вероятности различных возможных последствий своих действий и, соответственно, их положительные и отрицательные стороны. Человек выбирает степень риска интуитивно, а не на основе точных расчётов ожидаемых затрат и доходов.

Очевидно, что экономические стимулы влияют на запланированный уровень риска конкретного человека. Если он перемещает себя или товары из пункта А в пункт В ради заработка, то быстрая езда обеспечивает доход (время – деньги). Но при этом возрастает риск катастроф, стоимость топлива и износ автомобиля. На аварийный риск влияют и другие причины, помимо экономических. К ним относятся: поиск разнообразия, борьба со скукой, любопытство, страсть к приключениям, потребность в адреналине. Почти половина всех путешествий приходится на выходные и отпуска. В дорогу отправляются по разным причинам: для самопознания, размышлений, мечтаний, поиска работы или решения семейных проблем. Люди стремятся вовсе не к минимизации пробега или потраченного времени, а к удовольствиям: психической разрядке, единению с природной средой т.п.

Запланированный уровень риска человека в сфере транспортных катастроф определяется, как уровень субъективного риска аварий, при котором стремятся достигнуть максимального значения разницы между доходом и затратами. Возможны случаи, когда к риску обдуманно стремятся, но большинство рисков, которым люди подвергаются гораздо чаще, пассивно принимается, как неизбежное следствие несвободного выбора своих действий. Каждый, кто отправляется в путь, знает, что может попасть в аварию, или из-за собственного поведения, или из-за поведения других участников движения, которое невозможно ни предсказать, ни проконтролировать. Пассивное восприятие риска типично для путешествующих в общественном транспорте. Любой пассажир, оказавшийся на борту самолёта, поезда или автобуса принимает решение по риску лишь на стадии выбора способа путешествия. Затем он уже не контролирует события. Таким образом, субъективный уровень риска может быть в некоторых случаях описан как предпочтительный или желательный, но в других случаях его лучше трактовать как допустимый или терпимый.

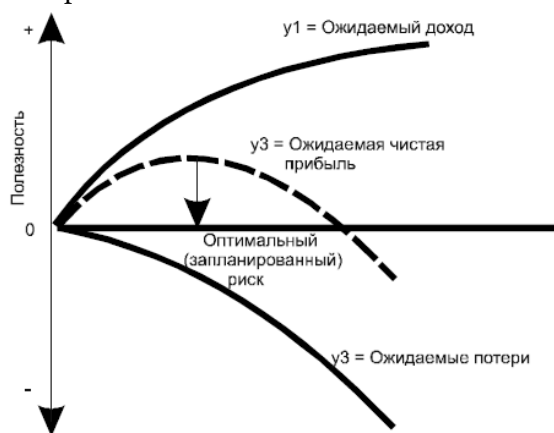


Рис. 3. Теоретическое представление водителей в виде максимизации чистого дохода и оптимизации риска. Функции определяют интенсивность и способ передвижения, так что ассоциированный уровень субъективного риска соответствует точке, при которой ожидаемый уровень дохода максимальным. Отметим, что кривая y_3 проведена так, что каждое значение y_3 равно соответствующему значению y_1 минус абсолютное значение y_2 .

Почему люди выбирают уровень риска катастроф отличным от нуля? Дело в том, что по мере увеличения риска катастроф (например, из-за увеличения скорости движения) увеличивается как

прибыль, так и убыток. Большая скорость уменьшает время путешествия, но связана с большим волнением и стрессом. Большая скорость также означает больший износ и повреждения автомобиля, высокую стоимость бензина, поражение в правах и ряд тяжёлых последствий, если авария все же произойдёт. Для каждой скорости движения и уровня субъективного риска катастроф, ожидаемый чистый доход равен ожидаемой прибыли минус ожидаемые потери. Кривая зависимости чистого дохода от скорости проходит через максимум. При нулевой скорости или при нулевом субъективном риске, нет движения, и чистый доход от путешествия равен нулю. Когда скорость чрезвычайно высока, ожидаемый убыток больше прибыли и чистый доход сначала падает, а затем становится отрицательным. Экстремума избежать невозможно. Поэтому люди ни минимизируют, ни максимизируют опасность катастроф, а пытаются максимизировать ожидаемый чистый доход от путешествия по дороге, выбирая скорость движения.

Некоторые различия в запланированном риске разных людей носят долговременной характер. К ним относятся: культурный уровень, состояние экономики, социальный статус человека, способность к безаварийной езде, профессия, возраст, уровень образования, пол и черты характера. Кратковременные вариации, относящиеся к одной и той же личности, могут быть вызваны такими обстоятельствами, как специфическая цель путешествия, необходимость прибытия вовремя, рассеянность, плохое настроение, усталость, влияние алкоголя и т.п. Наконец,

некоторые изменения в целевом риске кратковременны и могут быть созданы самой личностью в ходе путешествия. Запланированный уровень возрастает в ходе движения и падает, если обстановка позволяет водителю отдохнуть. Известно, что водители, длительное время проведенные за рулём, не притормаживают при выезде на главную дорогу, способны внедряться в такие разрывы между машинами, которые они считали совершенно непригодными в начале пути. Неожиданное изменение в условиях путешествия, типа ливневого дождя, при отсутствии укрытия, вынуждает пешеходов и велосипедистов устремляться к пунктам назначения, увеличивая риск катастроф.

Ожидаемый человеком уровень транспортных катастроф возникает из трёх источников: прошлый опыт его путешествий, собственная оценка аварийного потенциала конкретной ситуации и степень уверенности водителя в своей способности принимать правильные решения и хорошо управлять автомобилем в сложных ситуациях. Прошлый опыт водителя включает множество типов предыдущих событий: случаи, вызвавшие страх, транспортные конфликты, ситуации, близкие к авариям, неожиданные сигналы, аварии, свидетелем которых он был, рассказы друзей о катастрофах, чтение отчетов в средствах массовой информации. Этот опыт даёт водителю общее впечатление о степени риска на дороге. Текущая ситуация включает особенности дорожной среды (погода, разметка, знаки и сигналы), скорость движения и направление, а также поведение других участников движения. Люди определяют свою причастность к риску по этим особенностям. Запланированный уровень риска будет относительно низким, если человек уверен в своем водительском мастерстве, и высоким, если человек сомневается в своих возможностях.

Водители непрерывно отслеживают ощущаемый ими уровень риска, сравнивают его с запланированным уровнем и пытаются уменьшить разность между ними, независимо от того, положительна она или отрицательна. Точнее, они стремятся уменьшить расхождение до неразличимого уровня, НУ. Если разница между ощущаемым риском и запланированным уровнем риска ниже НУ, личность не изменяет своего поведения. Когда же она превышает НУ, человек выполняет корректирующие действия. Некоторые из этих корректирующих действий дают немедленный эффект, другие приводят к долгосрочным последствиям. Решения, оказывающие кратковременное влияние на безопасность, включают изменения направления движения, скорости, дистанции или траектории; сигналы другим участникам движения; использование ремней безопасности; включение или выключение фар; увеличение или уменьшение умственных усилий в решении водительской задачи; концентрация на специфической и общей бдительности.

Любое предпринятое действие, несёт объективную вероятность риска несчастного случая, большего или меньшего. Общая сумма всех предпринятых действий, вместе с объективным риском каждого из них, для всех пользователей дороги в регионе и за весь период времени (например, год), определяет число смертей от аварий на транспорте в этом регионе за год. Впоследствии эти потери влияют на уровень риска, который ощущают оставшиеся в живых участники движения. До тех пор, пока запланированный уровень риска остаётся неизменным, потери от несчастных случаев и степень последующей осторожности, отражающаяся на поведении водителей, связаны друг с другом во взаимно компенсирующем процессе, развертывающимся во времени.

Если в прошлом интенсивность несчастных случаев была ниже запланированного уровня риска, то в будущем водители сохраняют манеру езды и количество своих поездок. Но они будут поступать противоположным образом, когда прошлый опыт дорожных инцидентов, превышает запланированный уровень риска.

Пример 1. Теория гомеостаза риска дала объяснение тому, что случилось в Швеции и Исландии при переходе с левостороннего на правостороннее движение. К огромному удивлению многих, сразу после перехода число несчастных случаев в расчёте на душу населения упало, причём существенно, но впоследствии вернулось на прежний уровень. Согласно теории гомеостаза риска эти факты можно объяснить следующим образом. Из-за большого страха, возникшего из-за противоречия новых правил привычным навыкам вождения, водители сначала переоценили уровень риска несчастных случаев. Мысль проснуться следующим утром и двигаться по противоположной стороне дороги сделала водителей очень боязливыми. Некоторые дорожные эксперты ожидали гибельных последствий. Однако, собственный уровень риска намного превысил реальный. В результате водители стали вести себя необычайно осторожно, что привело к заметному падению числа аварий. Через год после изменения правил движения число жертв транспортных катастроф уменьшилось на 17%. Спустя некоторое время, водители поняли по личному опыту и из сообщений СМИ, что новая ситуация оказалась вовсе не такой опасной, как они полагали. Ощущаемый уровень риска уменьшился, приблизившись к запланированному уровню. Опасения, стимулирующие принятие предохранительных мер, уменьшились, осторожность действий стала не нужной, и число аварий вернулось к своему обычному уровню.

Хорошо бы сделать такие перестройки регулярными и осуществлять их во всех странах раз в два-три года!

Пример 2. Можно было бы ожидать, что полные потери в инцидентах на дорогах (сумма частоты аварий и их серьёзность) в дождливую погоду будут больше, чем в хорошую погоду. Но это не так!

Установлено, что аварии под дождём, хотя и более многочисленны в расчёте на километр пути, однако менее серьезны по своим последствиям, чем на сухой дороге. Например, в Канаде, число гибнущих на сухих дорогах на 40% выше, чем на мокрых. В Осло 15% всех инцидентов случается на дорогах, покрытых снегом или льдом, хотя они составляют только ~7% от всех дорог, но относительное число смертей в них ниже. Вырос материальный, но уменьшился персональный ущерб. В плохую погоду число автомобилей на дорогах резко падает. Так, в Англии, густой туман понижает объёмы перевозок до 70% от нормального уровня в будние дни и до 50% – в уикэнды. Это понижает число потенциальных участников аварий, а, следовательно, и число аварий. Сильный дождь заставляет водителей увеличивать интервал между автомобилями и уменьшать скорость движения, что уменьшает аварийность. Из примера следует, что водители стремятся к сохранению своего запланированного уровня риска. В плохую погоду они едут осторожнее, чем в хорошую. Причём настолько осторожнее, что число погибших в ненастную и снежную погоду становится даже меньше, чем в плохую.

Пример 3. Однажды часть парка такси в Мюнхене была оборудована анти-блокировкой тормозной системой, ABS, которая предотвращает блокировку колес при экстремальных условиях торможения, что обеспечивает лучший контроль за автомобилем в ходе быстрого замедления, особенно на скользкой дороге. Теория гомеостаза риска предсказывает, что водители обязательно изменят свое поведение и будут сохранять свою вероятность попадания в аварии в расчёте на час движения до тех пор, пока не изменят свой целевой уровень риска. Автомобили с и без ABS в этом парке такси были одинаковы. Шоферов случайным образом сажали на тот или другой тип автомобиля. Машина с ABS не отличалась от обычной. Отсутствовала какая-либо разница во времени дня, дня недели, сезона и погодных условий, в которых эксплуатировались оба типа такси. Среди общего числа 747 аварий случившихся в течение трёх лет, доля участия ABS-такси была не ниже, чем обычных, но слегка выше, оставаясь, однако, в пределах погрешности. Эти авто плохо представлены в подгруппе аварий, в которых виноваты шоферы такси, но ясно – в инцидентах, в которых водители были невиновны. Серьезность аварии не зависела от наличия или отсутствия ABS. Во второй части эксперимента исследователи установили акселерометры в 10 машин с ABS и в 10 без ABS, не предупредив водителей. Датчики измеряли g-силу ускорения и замедления по десять миллисекунд в ходе 3276 часов вождения. Обнаружено, что резкие торможения происходили чаще у авто с ABS. Одновременно фиксировали стиль вождения: наблюдатели (под видом пассажиров) выставляли оценки по некоторой шкале. Все оценки касались одного маршрута в 18 км. Скорости движения такси измеряли в четырёх определенных пунктах этого маршрута. Шоферы не знали, что велись наблюдения за их манерой вождения, а наблюдатели не знали, сидят ли они в машине с ABS или без. Водитель знал, снабжён ли его автомобиль ABS. Анализ оценок показал, что шоферы такси с ABS, осуществляли более крутые повороты, были менее точны в удержании на своей полосе движения, сокращали интервал движения, плохо корректировали свои действия при совместных маневрах и создавали большее число "дорожных конфликтов". Наконец, по сравнению с обычными, ABS такси двигались быстрее в каждом из 4 контрольных пунктах маршрута. Все эти различия были значимы. При продолжении этого эксперимента, исследователи анализировали аварии, зарегистрированные в течение дополнительного года. Никакой разности в числе аварий и их серьезности между с ABS и без ABS авто не наблюдалось, но ABS такси имели большее количество аварий при движении на скользких дорогах по сравнению с обычными авто. Большое снижение, однако, в полном числе аварий произошло на четвертом году эксперимента по сравнению с предыдущим трехлетним периодом. Исследователи приписывали это тому, что компания, в усилиях, уменьшить число аварий, заставила шоферов оплачивать часть затрат на ремонт авто, и пригрозила увольнением водителей, накопивших большое число инцидентов. Итак, реагируя на установку тормозов ABS, шоферы изменили свое водительское поведение. 1) Они использовали преимущества ABS, но изменений в числе аварий на единицу времени движения движению не было замечено. 2) Независимо от того, вели ли они авто с или без ABS, уменьшение числа несчастных случаев произошло, когда целевой уровень водительского риска был сокращен из-за увеличения стоимости опасного поведения.

Пример 4. В эксперименте в Нидерландах по воздействию ремня безопасности на стиль вождения проводили на автостраде длиной 105 км. Те водители, которых пристегнули, поехали быстрее, чем без ремней безопасности, стали притираться к впереди идущей машине, перестраиваться с большими скоростями, и с опозданием тормозить перед препятствием. Внедрение ремней безопасности привело к росту числа водителей, пострадавших при авариях!

Пример 5. Однажды, полицейский отдел города Nashville, Штат Теннесси, стал решительного расправляться с нарушителями правил дорожного движения. Число задержанных на 52% превысило норму. В это же время, разгорелся спор за жалованье между полицейской управой и городом, что стало причиной последующего изменения активности ГАИ. Усиленное штрафование было прервано тактикой, которую полицейские выбрали для усиления своей позиции на переговорах о зарплате: они понизили ловлю нарушителей до 36% от нормы. Через некоторое время спор разрешился, и число штрафов за нарушение правил езды вернулось к обычному

уровню. Итак, было 4 периода: сначала частота претензий была 100%, затем выросла до 152%, потом упала к 36% и, наконец, снова 100%. Саботаж полиции широко освещали средства массовой информации: радио, телевидение и газеты. Частота аварий с порчей имущества, травмами и гибелью людей была прослежена в течение этих периодов. Оказали ли эти изменения в активности ГАИ какое-либо влияние на частоту или серьезность инцидентов? Нет, согласно исследователям: *"настоящий ретроспективный анализ полицейских мер преследования нарушителей показал, что широкое изменение активности ГАИ не оказало никакого измеримого влияния на частоту или серьезность дорожных происшествий, даже когда вмешательства полиции пропагандировались"*. Возможно, что намного большая активность полицейского принуждения дала бы результат, но сомнительно, чтобы он был продолжительным. Если бы физически, материально и политически удалось увеличить принуждение в десять или больше раз, то интенсивности нарушений правил движения уменьшились бы. Но как только аварийность упадет, и проблема катастроф сократится, возрастет интерес широкой публики к социальным проблемам иным, чем дорожная безопасность. Другие, чем движение, факторы (насилие, воровство, вандализм, злоупотребление наркотиками) станут более актуальным на политической арене, на полицию перестанут давить и ГАИ лишится оснований, необходимых для поддержания интенсивности преследования нарушителей движения. Активность ГАИ уменьшится; водители обнаружат это, и станут склоняться к нарушению правил движения и инструкций. Постепенное возвращение к первоначальному числу аварий станет конечным результатом. Не стоит говорить, что краткосрочное снижение числа катастроф не заслуживает внимания, но то, что оно лишь временно следует признать.

Пример 6. Леди Осторожный Шофёр за четыре года попала в четыре аварии. Это – редкое событие, с вероятностью 1 на 10000 водителей. Ни в одной из этих аварий не было её ошибки. Это делает её случай ещё более редким. Во всех случаях происходили столкновения с другим автомобилем. Она была чрезвычайно осторожным водителем в том смысле, что ехала на своем фургоне со скоростью значительно ниже предельной скорости на четырех полосной автострате, на ней всегда был пристегнут ремень безопасности. При стоп-сигнале светофора она долго ждала пока интервал с впереди идущим авто станет достаточно большим и можно будет двигаться вперед. Если что-то было не так, она тормозила и останавливалась. Три раза в неё врезались сзади, причем в четвёртый раз - машина ГАИ! Леди Осторожный Шофер подарила интересный парадокс. Она была очень осторожна, настолько осторожна, что её поведение было непредсказуемо для других водителей. Это и втянуло её в аварии. Но! Если бы каждый вёл себя так же осторожно, как она, было бы меньше катастроф.



Анализ данных по количеству смертей на дорогах США в 20-м веке показал, что число несчастных случаев, выраженное как число смертей на 100 миллионов миль пробега, обнаруживает заметное и более или менее регулярное уменьшение. При этом полный пробег на душу населения, в тысячах миль на жителя, показывает точно противоположный ход: заметное и довольно регулярное увеличение. Произведение данных для этих двух кривых равно числу смертей на дорогах, приходящихся на 100000 жителей. Оказалось, что этот показатель смертности на душу населения не меняется во времени! Имеются отдельные взлеты и падения в смертности в автокатастрофах на душу населения, но они колеблются вокруг средней величины 23 гибели на 100000 жителей. Таким образом, как только смертность на км падает наполовину, люди удваивают пробег. При этом смертность в автокатастрофах в год в расчёте на душу населения остаётся неизменной.

В то время как интенсивность смертности, приходящаяся на единицу пробега, с годами значительно понижается, никакого систематического уменьшения гибели в автокатастрофах на душу населения не происходит из года в год. Это ставит вопрос, по какому критерию лучше всего измерять эффективность мер по безопасности движения: как смертность на км пробега или смертность на душу населения.

Уменьшение (примерно в восемь раз) смертности на единицу пути между 1923 и 1987 гг., вызвано строительством хороших дорог, созданием управляемых и безопасных автомобилей, улучшением работы скорой помощи, и т.п. В этом смысле достигнут большой прогресс. Напротив, на степень безопасности движения, рассчитанную на жителя в год принятые меры так благоприятно не воздействовали. С точки зрения теории гомеостазиса риска, это не удивительно, потому что теория ожидает, что люди изменят свое поведение сразу после принятия противоаварийных мер. Не просто изменят, а увеличат неожиданно снизившийся риск и подтянут его до привычного уровня. Но если их целевой уровень риска инцидентов не понизился, нет никакой причины ожидать, что число аварий в расчёте на одного водителя снизится. На тех участках дороги, где число несчастных случаев на километр и на транспортное средство низко, водители едут быстрее, так что число несчастных случаев в час на автомобиль остаётся по существу неизменным. Увеличение скорости в два раза позволяет преодолевать расстояние за время в два раза меньшее или, затратив одно и то же время в пути, можно удвоить расстояние. Таким образом, если построить хорошие безопасные дороги, то водители прореагируют, увеличив скорость движения и, следовательно, число аварий с тяжёлыми последствиями.

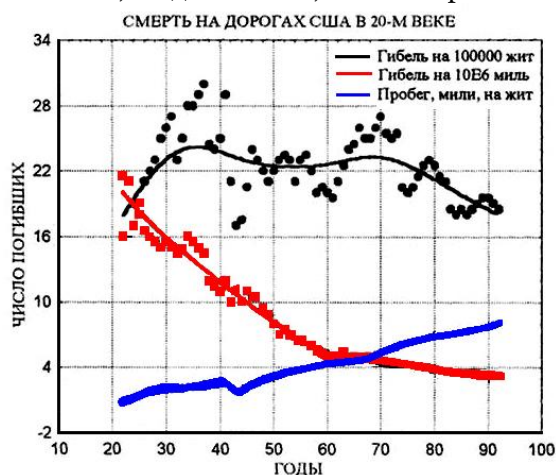
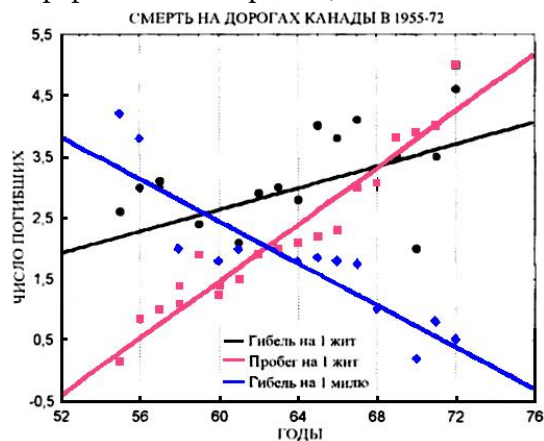


Рис. 4. Гибель в автокатастрофах, отнесённая на пройденное расстояние, смертность на душу населения, и пробег на душу населения в США, 1923-1987.

Если в качестве эффективного критерия безопасности мы возьмем число несчастных случаев на км дороги, техническая модернизация будет выглядеть эффективной. Министерство транспорта будет довольно. Нововведения подобного типа также продуктивны с точки зрения вашей собственной выгоды, потому что они позволяют вам быстрее преодолевать единицу пути и таким образом наслаждаться большим расстоянием перемещения при той же

величине риска смерти в час на дороге. Но с точки зрения здравоохранения, ситуация совершенно другая, так как не уменьшается число людей, погибающих на дорогах. Министерство здравоохранения будет не довольно. Но и вы тоже, потому что вероятность гибели на дорогах не уменьшилась, а возможно, даже увеличилась!

В некоторые периоды интенсивность смертей на единицу пути понижалась, в то время как интенсивность смертности в дороге на душу населения увеличивалась. В годы, следующие за Второй Мировой войной, включая 1972 год перед нефтяным кризисом, Канада испытала эру относительно стабильного экономического роста. Показатель смертности на единицу пути понизился, пробег автомобиля в расчёте на человека вырос, а показатель дорожной смертности на душу населения, в среднем, рос на 0.8 % в год. В этот период шла большая реконструкция дорог, строительство автострад с четырьмя полосами движения, которые обеспечили устойчивое и комфортабельное перемещение на автомобиле от города к городу. В результате, люди перебрались



из поездов, в собственные автомобили и на дороги. В 1955 поездки поездами составляли 296 км на душу населения, в 1972 - 151 км, причём поезда были в 30 раз безопаснее в расчёте пассажир/километр, чем автомобильные дороги. Поэтому неудивительно, что показатель дорожной смертности на жителя повысился.

Рис. 5. Число смертей на единицу транспортного пути и расстояние перемещения на душу населения в период экономического роста Онтарио в 1955-1972. Показатель смертности на единицу пути понизился, пробег машины на человека вырос, а показатель дорожной смертности на душу, в среднем рос на 0.8% в

год.

Это приводит нас к замечательному заключению: одна и та же мера против инцидентов может улучшить безопасность в расчёте на километр пути, но способствовать увеличению числа несчастных случаев на душу населения! Как выразился один исследователь: *"Обеспечение более безопасной деятельности может увеличивать смертность"*. Кажущийся парадокс этого утверждения состоит в том, что действия типа строительства более безопасного км дороги вызывает прилив к нему большего количества машин, поэтому большее количество людей погибает из-за этого благодеяния. Итак, внедрение большего количества безопасных автомобилей и идеальных дорог может привести к уменьшению показателя смертности на км дороги, не вызвав какое-либо изменения в показателе смертности на час пути, и привести к более высокому показателю смертности на дорогах в расчёте на душу населения.

Таким образом, снижение числа аварий на единицу пути можно рассматривать как триумф министерства транспорта, в то время как сопутствующее повышение смертности в дорожных происшествиях на душу населения может вызывать глубокую озабоченность в министерстве здравоохранения. Можно сказать, что *"да, операция была успешна, но пациент умер"*. Другими словами, технические новшества, внедрённые с целью большей безопасности, могут обеспечить большее количество километров пути на человека в год, но не в состоянии прибавлять годы к человеческой жизни.

Имеют место заметные колебания в ежегодных дорожных интенсивностях смертей на душу населения США в районах 1923 («Великая депрессия») и 1989 («Нефтяной кризис») гг. Согласно теории гомеостаза риска, всплески произошли из-за изменения в целевом уровне риска, а не вызваны технологическими, юридическими, образовательными или другими противоаварийными мерами.

Целевой уровень риска предполагает зависимость от четырех факторов:

1. Выгоды, ожидаемые от опасного поведения.
2. Затраты, ожидаемые от осторожного поведения.
3. Выгоды, ожидаемые от осторожного поведения.
4. Затраты, ожидаемые от опасного поведения.

Первые два фактора увеличивают целевой уровень риска, в то время как последние два его сокращают. Какие именно факторы вызвали колебания в целевом уровне риска? Ответ имеет экономическую природу.

Когда экономика находится на спаде, выгоды, ожидаемые от опасного поведения, сокращены, потому что время стоит меньше денег. Получают мало дохода от проезда многих км и от быстрой езды, не большой выгоды от проезда на красный или жёлтый свет или от срезания углов. В то же самое время, затраты, от опасного поведения увеличены: приходится платить за несчастные случаи, за бензин, за лечение попадающих в аварию, за автомобильный ремонт, за износ и повреждение транспортного средства и т.д. Затраты высоки, а реальный доход низок. Ожидаемый выигрыш мал, а потери круто возрастают, так что оптимальный уровень риска сдвигается в сторону более низкого уровня.

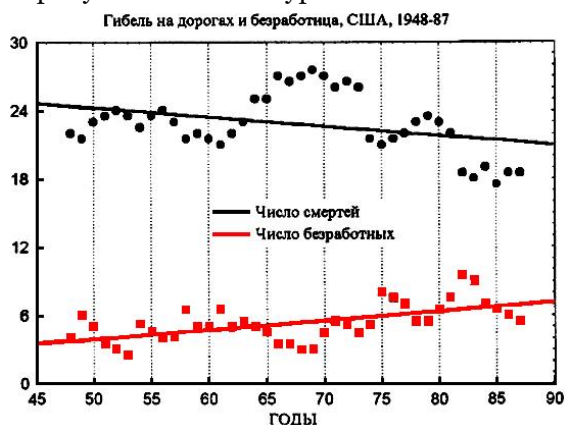


Рис. 6. Ежегодные вариации в уровне безработицы и интенсивности дорожных смертей на душу населения США в 1948 – 1987 гг.

Всегда, когда регистрировался рост безработицы, одновременно падал показатель дорожной смертности на душу населения. Уменьшение уровня безработицы происходит синхронно с уменьшением показателя смертности. Пики и высокие уровни показателя смертности, достигаются в тех же самых периодах времени, где регистрируются впадины и долины на уровне безработицы, и наоборот.

Итак, при плохих временах люди уменьшают пробеги и управляют автомобилем осторожней. Это доказывает, что *"ничто не так плохо, чтобы не быть хорошим для чего-нибудь"*.

Существует три типа мастерства водителя, которые влияют на уровень запланированного риска и последующие действия: воспринимающая способность, способность к принятию адекватных решений и умение управлять автомобилем. Способность к восприятию определяется близостью субъективного риска к объективному. Люди, не умеющие принимать правильные решения или плохие водители, имеют малый риск катастроф, если осознают свои недостатки и действуют осторожно. Как сказал Леонардо да Винчи: *"Тот, кто страшится опасностей не пострадает от них"*. При этом, если способные к решениям и умелые водители переоценивают свое мастерство, их риск аварий выше чем у неспособных и неумелых. Аналогично, водители с

очень большими уровнями всех трех типов мастерства, но с высоким уровнем запланированного риска, вероятнее попадут в аварии, чем люди с низкими уровнями мастерства. Искусство принятия решения означает способность оператора провести требуемую регулировку для минимизации разницы между запланированным и ощущаемым уровнями риска. Естественно, многое зависит от водительского искусства: насколько эффективно он может осуществить собственное решение.

Уровень выполнения некоторой задачи можно улучшить двумя способами: подгонкой оператора к задаче или подгонкой задачи к оператору. Первое можно достигнуть путём подбора хорошего режима тренировки, путём многократного повторения решения задачи и ознакомлением человека с его уровнем мастерства. Второе достигается улучшением рабочего места, позволяющим оператору лучше выполнить задачу. Уровень водительского искусства может быть повышен путём собственного обучения вождению, либо путём дизайна техногенного окружения, включая модернизацию автомобиля, дороги и сигнализации. Многие из этих нововведений не будут давать устойчивый эффект с точки зрения потерь от аварий на дороге. Только те меры, что влияют на привычный уровень риска населения, могут достигнуть цели.

Почему это так?

Ответ прост: задача участника движения, как он видит её и как её выполняет, состоит не в минимизации риска несчастных случаев, а в оптимизации его путём приведения в соответствие с запланированным уровнем. Человек пытается привести свой целевой уровень риска в соответствие с максимальным чистым доходом, который он может получить из своей манеры езды. Желание извлечь максимальный доход даёт сильную мотивацию к усовершенствованию мастерства. Лучше развитие способностей и умений, облегчающих выбор способов действия, чем высокий уровень риска. Мастерство служит не для минимизации риска, а для оптимизации его. Уровень водительского мастерства у людей не оказывает влияния на потери от несчастных случаев в расчёте на душу населения, но для отдельных водителей индивидуальное различие в мастерстве важно с точки зрения вероятности их персонального выживания.

Ввиду некорректного восприятия объективного риска катастроф, некоторые люди переоценивают риск, тогда как другие недооценивают. Недооценивающие риск получают больше риска, чем запланировали, тогда как переоценивающие опасность получают меньше риска, чем имели бы, будь они лучше информированы.

Рассмотрим воображаемую образовательную программу, направленную на выработку у широких слоев населения улучшенного осознания реальности. Она должна уменьшить риск для недооценивающих и увеличить его для переоценивающих. При этом некоторые будут приобретать лучшую возможность выжить, ибо они больше не будут недооценивать объективный риск, тогда как другие с большей вероятностью погибнут, т.к. они больше не переоценивают объективный риск. Будут ли общенациональные потери от несчастных случаев уменьшены благодаря нашей воображаемой образовательной программы? Потери будут уменьшаться, если средний воспринимаемый уровень риска в популяции был существенно ниже, чем объективный уровень риска, т.е. когда число случаев недооценки риска превосходит число случаев переоценки риска. Повышение целевого уровня риска населением – полезная вещь. Но образование способно ухудшить ситуацию, если целевой риск у людей понизится: они без страха бросятся в авантюры и погибнут. Поэтому к образованию надо подходить осторожно!

Возникает вопрос: недооценивают ли обычно люди объективный риск несчастных случаев? Исследования показали, что водители достаточно хорошо согласны друг с другом при сравнении аварийности различных участков дороги. Их коллективное восприятие риска соответствует объективному числу несчастных случаев/автомобиль/ километр на каждом участке дороги. Тот факт, что водители коллективно дают точную оценку относительного риска, не уменьшает возможность, пере- или недооценивания группой автолюбителей объективного уровня риска конкретных маневров в конкретных дорожных ситуациях или дорожного движения в целом.

Если вы спросите водителей, как они сами оценивают свое водительское мастерство, обычно окажется, что более половины из них водит лучше среднего. Этот арифметический абсурд часто наблюдается при обследовании других сфер жизнедеятельности человека и вызван тем фактом, что излишняя самоуверенность встречается чаще, чем недооценка себя самого. Люди склонны к надеждам, они нереалистично оптимистичны, а не нереалистично пессимистичны. Люди чаще недооценивают транспортный аварийный риск, подвергая себя ему. Есть два фактора, которые должны приглушить любой энтузиазм от нашей воображаемой общенациональной программы улучшения восприятия риска, как средства уменьшения числа катастроф на душу населения. Один из них уже упоминался – программа будет приводить к увеличению риска несчастных случаев для переоценивающих риск. Другой фактор связан с людьми, переоценивающими свое мастерство, но контролирующими себя, проявляющими больший оптимизм и упорство в решении задачи, а также психическое здоровье.

Традиционная политика увеличения дорожной безопасности проходит под флагом "Трех Е": Техника, Образование и Принуждение (*Engineering, Education and Enforcement*).

В теории гомеостаза риска не отрицает выгоды безопасности, которые можно получить через образование или обучение. Под "образованием" мы понимаем усилия, направленные на

просвещение и воспитание, с тем, чтобы передать как можно большее количество зрелых представлений, знаний и оценок. "Обучение" означает прививку реального восприятия окружающей среды, принятия правильных решений и развития водительских навыков. Тезис, что образование может принудить людей к понижению своего запланированного риска, совместим с теорией гомеостаза риска. Мы должны быть нацелены на уменьшение целевого уровня риска, как посредством материальных стимулов, так и через расширение морального осуждения, внедрение осознания безопасности, понимание персональной ответственности, учёта мнения других людей.

С обучением, однако, дело обстоит сложнее. Согласно ТГР обучение нельзя использовать

для уменьшения гибели на дорогах.

Тем не менее, обучение водителей часто рассматривают как противоядие от несчастных случаев. Некоторые страны даже требуют обязательного официального обучения водителя. То, что мудрость этого сомнительна, иллюстрируется историей с законом Квебека, который сделал курсы обучения водителей принудительными для любого желающего получить водительские права. Этот закон не оказал заметного влияния на частоту или серьезность инцидентов среди недавно получивших права водителей.

Британские исследователи сравнили число аварий с водителями, обученными следующими способами: (а) автошкола, (б) друг или



родственник, и (в) комбинированное обучение. Безопасность выражали в терминах среднего числа км дороги на число аварий. Чем выше этот коэффициент, тем безопаснее. В первой группе (а) среднее число было 19,4 км; с другом или родственником (б) – 22,8 и для комбинированного обучения (в) 14,5 км. Другими словами, самая наибольшая безопасность была в группе (б) – среди тех водителей-новичков, которые не получили никакой профессиональной подготовки. В эксперименте, который проводился в США, претендентам на водительские права не позволяли выбирать, а произвольно назначали одно из трёх условий обучения. Первое было разработано Национальной Администрацией Дорожной Безопасности Движения и считалось наиболее расширенным и полным обучением. Оно включало 32 часа инструктажа в классе, 16 часов – на тренажере, 16 часов вождения на площадке, 3 часа практики маневров в непредвиденных случаях, и более 3 часов вождения по городским улицам, включая 20 минут ночной езды. Вторая группа обучалась по минимальной программе, обеспечивающей навыки, необходимые для удовлетворения критерию водителя. Она включала всего 20 часов инструкций в классе, на площадке и на тренажере, и только один час вождения. Третья группа студентов не получила никакого формального обучения и тренировалась родителями. Водители, закончившие лучшую программу обучения, быстро получили водительские права и имели **большее** количество аварийных ситуаций, чем те, кто получил минимальное обучение или вообще не обучались ни в какой шоферской школе. Нет никакой существенной разности в числе аварий среди водителей последних двух групп.

Очевидно, что результаты этого крупномасштабного эксперимента не поддерживают идею, что улучшение образования водителя предотвращает аварии. Это согласуется с ожидавшимся на базе теории гомеостаза риска. Но почему дипломированные специалисты высшего уровня обучения дали наихудшие результаты? Объяснение заключается в том, что студенты минимального курса, закончили его с сильным недоверием к собственным навыкам вождения, что привело к затруднениям в получении прав и большим количествам предостережений в начальный период самостоятельного вождения. Отдельные тесты водительских навыков группа с интенсивным обучением выполнила лучше, чем группа с минимальным обучением, и впоследствии добивалась большего успеха, чем группа плохого обучения. Так что навыки не могли вызвать различия. Наиболее вероятно, что различие возникло из-за самонадеянности "отличников", из-за недооценки риска, из-за переоценки собственной способности, вдохновленной привилегией получения "супер" образования. Новички чаще переоценивают риск инцидентов чем, недооценивают. В равных условиях, они реже попадают в аварии.

Попытаемся путём обучения исправить эту переоценку риска. Тогда дополнительное обучение приведёт к увеличению числа несчастных случаев, потому что дипломированные специалисты считают себя более компетентными. Итак, лучшее обучение будущих водителей – не обязательно означает меньшее количество несчастных случаев.

Критики сразу же определили теорию гомеостаза риска, ТГР, как **"дикие законы сохранения страдания"** и **"дьявольский соблазн безопасности сообществ"**. Они утверждали, что её так же трудно доказать, как существование Бога (что не так, слава Богу) или просто обзывали банальностью. Одни полагали, что **"...требование, чтобы риск на единицу времени был**

постоянен, аналогично требованию, чтобы все люди были одинакового роста или думали, что они одинакового роста". Другие писали: *"существенные аргументы против применимости гомеостаза риска основаны на непоследовательности её теоретических формулировок.* Теорию гомеостаза риска порицали за "нигилизм" или "пессимизм" так как она бесполезна с точки зрения предотвращения катастроф.

Эта критика легко парируется: во-первых, гомеостаз не означает постоянства, во-вторых, нет никакого нигилизма в утверждении, что Солнце не вращается вокруг Земли, как люди полагали столетия. Какой ты нигилист, если ты говоришь, что что-то неправильно работает? Нет ничего пессимистического в ТГР с точки зрения потенциала для предотвращения катастроф. Теория как раз утверждает, что интенсивность катастроф в расчете на километр пути может быть снижена. Да, критикуются традиционные меры предупреждения несчастных случаев с автолюбителями, неспособные уменьшить интенсивность катастроф на душу населения, но зато предлагаются другие меры повышения безопасности на дорогах. Сторонник ТГР не более пессимистичен, чем терапевт, говорящий своему пациенту, что воспаление горла нельзя вылечить кровопусканием, одновременно вручая ему рецепт на антибиотики.

Управление величиной запланированного риска можно проводить разными путями. Выше мы упоминали, что образование способно изменить этот параметр (в отличие от обучения, которое не всегда может дать положительный эффект). Другие методы основаны на агитации в средствах массовой информации. Для успеха пропаганды каких-то идей (в нашем случае – идеи снижения целевого риска) следует соблюдать некоторые правила.

Известно, что воздействие сообщения зависит от доверия агитируемого к агитатору. Результат будет большой, если агитатор воспринимается как хорошо осведомлённый, заслуживающий доверия и свободный от личного интереса в пропагандируемой сфере. Воздействие будет большим, если агитатор чем-то подобен агитируемому. Подобие здесь относится к таким характеристикам как возраст, пол, язык, социальный класс, индивидуальные черты и т.д. Агитируемый должен чувствовать, что агитатор во многом подобен ему, испытывает те же потребности и жизненные цели, т.е. он «наш». Тогда агитируемый может изменить свои воззрения. "Психологическое расстояние" между агитатором и агитируемым сокращается, если провозглашаемые идеи поддерживает аудитория.

Должен ли агитатор призывать к очень сильным изменениям? Чем к большему изменению мы призываем, тем больше будет изменение. Но пропагандируемое изменение, не должно превышать "широту приемлемости". Если пропагандируемое изменение превышает широту приемлемости, никакое фактическое изменение не произойдет или, что хуже, эффект будет обратным: агитируемые изменят свою позицию, но в направлении противоположном пропагандируемому.

Пример 1. В 60-минутной телевизионной программе (в США) разъясняли опасность управления автомобилем в пьяном виде. В противоречии с математическим ожиданием и намерением авторов, программа уменьшила беспокойство слушателей относительно путешествия на выходные. Это произошло вследствие того, что программа, сосредоточенна лишь на одном источнике опасности, а именно, на выпивке. В результате на 20% увеличилось число тех, кто чувствовал, что повышенный риск, обсуждаемый в программе, не касается лично его. Не пьющие слушатели считали, что программа относится только к пьющим водителям и никак не затрагивает их собственного поведения. *Понятно, что пьяный попадёт в аварию. Но я-то не пью, поэтому со мной ничего не случится, могу вести машину, как мне хочется.*

Пример 2. На участке автомагистрали с шестью полосами движения в Австрии, попытались уменьшить скорость движения, которая составляла более 100 км/час. В одном месте установили знак ограничивающий скорость до 80 км/час. В другом месте - знак ограничения до 100 км/час. Второй знак оказал большее влияние на уменьшение скорости, чем первый.

Для большей эффективности, сообщения должны быть конкретны. Общие лозунги типа *"Безопасность первостепенна", "Живому - здоровая жизнь", "Безопасность - не случайность",* или *"Алкоголь уничтожает медленно"* не дают результата. Сообщение должно ясно разъяснить то, какой тип поведения защищается. Что-то вроде: *"Не пил? За руль!"* предпочтительней. Сообщение должно создать состояние мотивации у агитируемого. Мотивирующие обращения принадлежат состояниям, которые личности сами стараются или достигнуть (романтизм, престиж, самореализация) или избежать (ужас, боль, смерть, печаль или насмешка). Но сильные послышки страха вызывают отвращение и ведут к тому, что называется "защитное предохранение": агитируемые теряют внимание к сообщению. Умеренные обращения к страхам полезны, при условии, что аудитория имеет возможность предпринять защитное действие, сокращая испуг. Сообщение оказывает воздействие, если агитируемый может сразу реализовать то, к чему его призывают. Так, телевидение – канал, плохо пригодный для пропаганды езды с использованием привязного ремня или поездок с противотуманными фарами. Но оно эффективно для рекламы против алкоголя и сигарет. Сообщения средств массовой информации обычно имеют прямое воздействие только на относительно малое число слушателей – лидеров мнений, ранее других воспринимаящих советы. Лидеры затем передают свое измененное поведение другим личным примером. Эффективность увеличивается, когда поведение заметно отражается на всех. Хорошие

результаты получают, когда пропагандируемое изменение реализуется поведением, бросающимся в глаза. Таким образом, для цели расширения эффективности сообщений по безопасности полезно усилить персонально влияющую связь в цепочке массовой коммуникации. Лидеров следует поощрять, например, снабжая их пуговицами или другими значками, благодаря которым другие воспринимают их как сторонников или противников определенных идей.

Пример. Добровольное использование привязного ремня, удвоилось в той части Франции, где его пользователи были поощрены наклейкой на бампер с надписью; *"Я застегиваю ремень безопасности. А Вы?"*

Сообщения средств массовой информации, если они хорошо воспринимаются, могут оказать значительное влияние на поведение людей. Но эти сообщения конкурируют за внимание с другой информацией и могут не привлекать внимания. Сообщения об инцидентах в газете – наиболее читаемый материал, но они не оказывают влияния на читателя, так как сам читатель избегает происшествий. Для преодоления этого недостатка, в одной газете Онтарио применили образовательный репортерский стиль описания аварий. О несчастных случаях сообщали с большим количеством деталей относительно причинной цепочки событий. Они были описаны в человеческом контексте причин и следствий. Раз в неделю приводили статистику инцидентов, включая дату, место и серьезность. Критическая особенность этой "образовательной журналистики происшествий" состояла в том, что излагали обстоятельства инцидентов. Например: роль алкоголя, возраста и пола, привязных ремней и др. Социологические опросы водителей проводили по телефону до и после восьми недельного применения образовательного репортерского стиля изложения инцидентов. Существенные изменения наблюдались в мнении народном относительно способа сообщения об инцидентах, об их восприятии тяжести последствий, и в значении проблемы инцидентов относительно других видов социального интереса. Особенность этого эксперимента состояла в том, что репортаж об авариях со смертельными исходами использовался для распространения общего знания о причинной обусловленности инцидентов и их предотвращении.

К сожалению оценки эффективности программ средств массовой информации по критерию уменьшения инцидентов проводятся очень редко. Известна одна такая кампания оказавшаяся успешной в этом отношении, – Программа "Правила Зеленого Перехода", нацеленная, на обучение детей безопасному переходу улицы:

- Найди безопасное место для перехода и остановись.
- Встань на тротуаре у бордюра.
- Просмотри вокруг и послушай.
- Если транспорта много, пропусти его, посмотри вокруг снова.
- Когда нет машин, иди прямо поперек дороги.
- Продолжай смотреть за обстановкой на улице, в то время как пересекаешь улицу.

Семь миллионов брошюр, объясняющих Программу, было распределено в Великобритании. Контрольные листки заполнялись родителями, удостоверяющими, что их ребенок доказал понимание Правил, при трехкратном переходе дороги под наблюдением родителей. Программа освещалась в газетах и по телевидению. Выпускали эмблемы и давали объявления в кинотеатрах. Каждая семья в среднем пять раз видела сообщения по телевидению, и четырнадцать – в газете. Предполагаемые на основе предыдущего опыта интенсивности катастроф сравнивали с фактическим числом несчастных случаев. 11% процентное падение интенсивности наезда на детей возраста от пяти до девяти лет найдено в течение трех месяцев реализации Программы. Экономия расходов на медицинское обслуживание перевесила расходы на Программу.

Этот результаты удивительно хороши. Но всё же успех Правил Зеленого Перехода определился активным участием родителей, а не прямым влиянием на детей средств массовой информации. Было обнаружено, что, в период реализации Программы, не только уменьшились наезды на детей, но и на взрослых.

Выводы

1. Статистических анализ происшествий в большинстве развитых стран мира показывает, что в течение всего 20-го века не происходило уменьшения числа гибели людей на дорогах, несмотря на смену видов транспорта, усовершенствования транспортных средств, дорог, законодательства, мер скорой помощи и т.п.
2. Теория гомеостаза риска, предложенная Геральдом Уилдом в 1994 году и учитывающая склонность людей поддерживать свой субъективный риск на постоянном уровне, хорошо описывает, как поведение водителей на дорогах, так и статистику несчастных случаев на транспорте.
3. Количество людей, погибающих на всех дорогах в течение года, можно уменьшить только путём снижения уровня таргетного риска каждого участника движения.

Замечание. Данная лекция написана на основе книги

Gerald J.S. Wilde // **Target Risk** Dealing with the danger of death, disease and damage in everyday decisions. // PDE Publications. Toronto, Ontario, Canada, 1994.

До сих пор мы рассматривали риск на качественном уровне. Пора перейти к количественному описанию. Для этого нам придётся перейти в сферу высшей математики.

**Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Химический факультет**

Междисциплинарный университет Бекмана

**Профессор, д.х.н.
Бекман Игорь Николаевич**

ГЕОМЕТРИЯ ФРАКТАЛОВ

Курс лекций

Москва, 2010

Аннотация

Конспект лекций для студентов обучающихся в рамках программы междисциплинарного образования, посвящен основам фрактальной геометрии, и её применению в искусстве, науке, технике и экологии. Основное внимание уделено идее самоподобия - наиболее важной симметрии из встречающихся в природе. В первой части курса рассмотрен математический аппарат фрактальной геометрии и способы построения фракталов различного типа. Затем приведены иллюстрации применения фракталов в искусстве (в музыке, в живописи, скульптуре и дизайне). Дан краткий анализ генерации фракталов в сфере математической физики, в частности, их роль в дифференциальных уравнениях в частных производных с дробными степенями. Приведено описание фликкер- спектроскопии, включая исследование эффекта интермиттанса. Во второй части курса описано применение фракталов для моделирования различного рода объектов (деревья, коллоидные частицы и аэрозоли, дендриты, береговая линия моря, плазма и т.п.) и процессов (броуновское движение, миграция, диффузия, перколяция, адсорбция, турбулентность и т.п.). Третья часть курса посвящена применению геометрии фракталов в математике, физике, химии, материаловедении, биологии, географии, геологии, экологии, экономике, а также для анализа текстов и временных рядов (на примере, цены акций и флуктуации радиационного фона).

Содержание

Предисловие

- 1. Геометрия фракталов**
- 2. Красота фракталов**
3. Фракталы, хаос и синергизм
4. Фракталы в нелинейной динамике
5. Уравнения в частных производных и геометрия фракталов
6. Фракталы в географии, геологии и метеорологии
7. Фракталы в физике
8. Фракталы в химии
9. Фракталы в материаловедении
10. Фракталы в диффузии
11. Фракталы в описании миграции токсинов в природных и техногенных средах
12. Фракталы в биологии и экологии
13. Фракталы в информатике
14. Фракталы в Библии и других религиозных текстах
15. Фликкер-спектроскопия и фракталы
16. Фракталы в экономике и финансах

Оглавление

Предисловие	2
Лекция 1. ГЕОМЕТРИЯ ФРАКТАЛОВ	3
Лекция 2. КРАСОТА ФРАКТАЛОВ	20
2.1 Музыка	20
2.2 Фракталы в дизайне, скульптуре и архитектуре.....	25
2.3 Фракталы в живописи	25

Предисловие

Окружающий нас мир состоит из предметов различной формы и процессов, как периодических, так и случайных. Далеко не все из них способна описать современная математика. Хотя определённый прогресс наметился - помимо трёх старых геометрий (геометрия Евклида, Римана и Лобачевского) появилась геометрия фракталов, вовлекшая в количественный анализ целый ряд объектов исследования, которые одновременно характеризуются ломаной линией и самоподобны).

Евклидова геометрия (или **элементарная геометрия**) — геометрическая теория, основанная на системе аксиом, впервые изложенной в "Началах" Евклида (III век до н.э.). Аксиомы Евклида носят очевидный характер: от всякой точки до всякой точки можно провести прямую; ограниченную прямую можно непрерывно продолжать по прямой; из всякого центра всяким раствором может быть описан круг; прямые углы равны между собой; параллельные прямые не пересекаются и т.п. Важно, что геометрия Евклида реализуется на поверхностях с нулевой кривизной.

Геометрия Римана реализуется на поверхностях с постоянной положительной кривизной - на выпуклых объектах (на сферах). Как известно, на глобусе меридианы (параллельные линии) пересекаются, причём в двух точках: на северном и южном полюсах.

Геометрия Лобачевского реализуется на поверхностях с постоянной отрицательной кривизной - на вогнутых объектах. В пиале параллельные сходятся в одном полюсе (на дне пиалы) и расходятся на бесконечные расстояния при движении в противоположную сторону.

Все эти геометрии имеют дело с объектами или физическими процессами, которые можно описать гладкими законами или функциями, которые непрерывны и могут быть продифференцированы в любой точке. Но в природе множество объектов ломаной формы. В этом легко убедиться, взглянув на облака, морозные узоры на стекле, берег моря (особенно в Норвегии) и т.п. Упомянутые математики хорошо пригодны для описания периодических процессов. Но в природе много хаотических явлений, например, возникновение под действием порыва ветра волн на гладкой поверхности озера.

Предложенная Бенуа Мандельбротом в 1975 году геометрия фракталов позволила существенно расширить объекты исследования, распространив математические методы на объекты с чрезвычайно тонкой структурой. Конечно не на все объекты с разрывными (не дифференцируемыми) функциями, а только самоподобные, инвариантные относительно изменения масштаба (т.е. выглядящие одинаково при любой степени увеличения).

Теперь четыре геометрии охватывают широкий набор объектов, то далеко не все. Остальные ждут очередного гения.

Фрактал (*fractus - состоящий из фрагментов, ломаный, разбитый*) - структура, состоящая из частей, которые в каком-то смысле подобны целому.

Фрактал - геометрическая фигура с интересными особенностями. Она, например, состоит из частей, представляющих собой уменьшенную (необязательно точную) копию целого. В свою очередь каждая часть разбивается на ещё меньшие копии до бесконечности. Математики говорят: "Бесконечно самоподобная фигура". А самое удивительное - это фигура с дробным числом измерений, то есть не двухмерная и не трёхмерная, а, скажем, 2,76-мерная.

Предлагаемый курс лекций посвящён самоподобию - наиболее важной симметрии из встречающихся в природе. Сначала мы рассмотрим основные идеи фрактальной геометрии и способы построения фракталов различного типа. Затем перейдём к иллюстрации применения фракталов в искусстве (в музыке, но в основном - в живописи, скульптуре и дизайне). Дадим краткий анализ генерации фракталов в сфере математической физики, в частности, их роль в дифференциальных уравнениях в частных производных с дробными степенями. Некоторое внимание уделим фликкер- спектроскопии, включая исследование эффекта интермиттанса. После чего займёмся применением фракталов для моделирования различного рода объектов (деревья, коллоидные частицы и аэрозоли, дендриты, береговая линия моря, плазма и т.п.) и процессов (броуновское движение, миграция, диффузия, перколяция, адсорбция, турбулентность и т.п.). Основная часть курса будет посвящена применению геометрии фракталов в математике, физике, химии, материаловедении, биологии, географии, геологии, экологии, экономике, а также для анализа текстов и временных рядов (на примере, цены акций и флуктуации радиационного фона). Закончим мы анализом перспектив развития идейных основ и использования фрактальной геометрии в науке, технике и искусстве.

Конспект подготовлен для магистров МГУ, выбирающих курсы лекций в рамках междисциплинарного образования.

Лекция 1. ГЕОМЕТРИЯ ФРАКТАЛОВ

Данная лекция направлена на введение слушателей курса в мир фракталов и самоподобных объектов. Рассмотрены основные идеи фрактальной геометрии, способы построения фракталов различного типа и некоторые их практические применения.

Геометрия Эвклида имеет дело с "гладкими" объектами: шар, яйцо, цилиндр, кубик и т.п. Такие объекты можно найти в природе, но они редки. Обычно контуры, поверхности и объёмы окружающих нас предметов не ровны, не гладки и не совершенны. Они неровны, шершавы, изъязвлены множеством отверстий самой причудливой формы, пронизаны трещинами и порами, покрыты сетью морщин и царапин. Можно ли их как-то количественно описать? Геометрия фракталов говорит: не все, но многие можно. Если они самоподобны. Геометрии, общей для всех объектов, пока не существует.

Начнём с геометрии Эвклида. Дан шар радиуса r . Площадь сечения по экватору $S=\pi r^2$, длина экватора $l=2\pi r$, периметра к площади

$$\frac{l}{S} = 2 \frac{1}{r} = 2 \cdot r^{-D}, \text{ где } D=1. \quad (1)$$

Площадь поверхности шара $S=4\pi r^2$, объём $V=(4/3)\pi r^3$, отношение

$$\frac{S}{V} = \frac{4 \cdot 3 \cdot \pi r^2}{4\pi r^3} = 3 \frac{1}{r} = 3 \cdot r^{-D}, \text{ где } D=1 \quad (2)$$

Отношение

$$\frac{l}{V} = \frac{2 \cdot 3 \cdot \pi r}{4\pi r^3} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{r^2} = 1,5 \cdot r^{-D}, \text{ где } D=2. \quad (3)$$

Имеем показательные функции с некоторым множителем (на него не обращаем внимания - он нас в дальнейшем интересовать не будет) с показателем степени D , который имеет ЦЕЛОЧИСЛЕННЫЕ значения: здесь или 1 или 2. Важно, что это не только свойство сферы, но свойство любых геометрических тел, свойство геометрии Эвклида.

Если я возьму яблоко, то в пределах ошибки измерения у меня получатся те же зависимости. А если я откушу гнилыми зубами кусок яблока, то что произойдет с геометрическими характеристиками осадка?

Эксперимент будем проводить так: утопим огрызок в стакане воды, и по количеству вытесненной воды определим его объём V , затем покрасим огрызок и по количеству затраченной краски (зная сколько краски идёт на 1 см²) найдём величину поверхности огрызка. Введя некоторый масштабированный параметр r , получим

$$S/V \sim r^{-D}, \quad (4)$$

где D - дробное число, в зависимости от развитости рельефа и размерности пространства лежащее где-то между 0 и 3.

Далее мы будем называть D учёным словом ПОКАЗАТЕЛЬ ФРАКТАЛОВ. Но является ли огрызок яблока фрактальной структурой? Нет, не является. Колобок дифференцируем в любой точке, и потому попадает под геометрию Эвклида, ёжик не дифференцируем ни в одной точке, D у него дробное, но фракталом он не является.

Чтобы объект отнести к фракталам мало иметь дробное значение D (хотя иметь, конечно, надо обязательно), нужно, чтобы структура была самоподобна, масштабно инвариантна (обладать скейлингом). Грубо говоря, картина при любой степени увеличения в своих основных чертах должна оставаться неизменной (т.е. с каким бы шагом (большим или самым мелким) не измерял бы я длину, величина D должна оставаться постоянной). Ни с Колобком, ни с огрызком яблока, ни с

ежом такого не получится, а вот с облаками, горами, дельтой реки может получиться (хотя и не всегда). Существуют чисто математические объекты, к которым дробность и самоподобие применимы на 100%.

Сказанное выше - вольная интерпретация красивой идеи. Займёмся теперь грамотным обоснованием фрактальной геометрии.

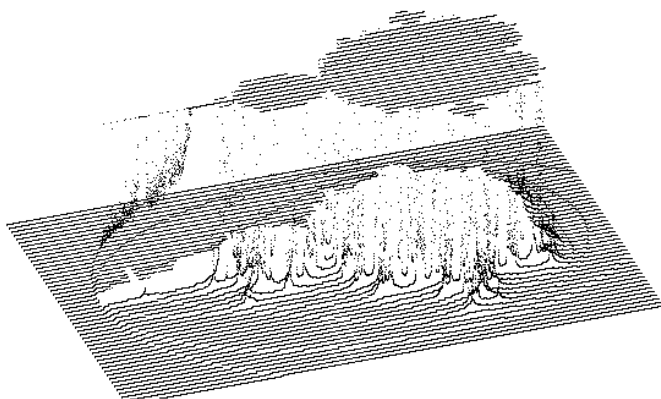


Рис. 1. Трёхмерное множество Мандельброта и его проекция.

Фракталы — язык геометрии. Однако их главные элементы недоступны непосредственному наблюдению. В этом

отношении они принципиально отличаются от привычных объектов евклидовой геометрии, таких,

как прямая линия или окружность. Фракталы выражаются не в первичных геометрических формах, а в алгоритмах, наборах математических процедур. Эти алгоритмы трансформируются в геометрические формы с помощью компьютера. Репертуар алгоритмических элементов неисчерпаем. Овладев языком фракталов, можно описать форму облака так же чётко и просто, как архитектор описывает здание с помощью чертежей, в которых применяется язык традиционной геометрии.

С математической точки зрения фрактал (*fraction, fractional* - дробь, дробный) - это прежде всего множество с дробной размерностью. В геометрии Эвклида точка имеет размерность 0, отрезок и окружность - размерность 1, круг и сфера - размерность 2. Феликс Хаусдорф (1868-1942) в 1919 г. первым нашёл в математике множества с дробной размерностью (канторово множество, кривая Коха и др.). Это направление развивал Абрам Самойлович Безикович (1891-1970), размерность Хаусдорфа-Безиковича нашла применение в некоторых разделах математики, но громадный интерес к ней возник после публикации в 1975 году Бенуа Мандельбротом (1924-2010) книги (наиболее известное издание [*Benoit B. Mandelbrot//The Fractal Geometry of Nature Henry Holt and Company, 1983, P. 468*](#)), в которой он привёл яркие примеры применения фракталов к объяснению некоторых природных явлений. Он выделил те математические множества и объекты, которые можно разбить на сколь угодно малые части, причём каждая часть окажется просто уменьшенной копией целого: если мы будем смотреть на фрактал в микроскоп, то увидим ту же самую картинку, что и без микроскопа. Успех фракталов связан с тем, что он воспользовался удобной количественной мерой неидеальности объектов - извилистости, морщинистости, трещиноватости, пористости объёма - размерностью Хаусдорфа-Безиковича.

Фрактал (*fractus — дроблёный, состоящий из фрагментов*) — термин, введённый Б.Мандельбротом в 1975 году для обозначения множеств с дробной размерностью Хаусдорфа-Безиковича (НВ). Для самоподобных множеств, типа канторовского множества, НВ-размерность совпадает с размерностью подобия.

Применительно к идеальным объектам классической евклидовой геометрии она давала те же численные значения, что и известная топологическая размерность (иначе говоря, была равна нулю для точки, единице - для гладкой плавной линии, двум - для фигуры и поверхности, трем - для тела и пространства). Но совпадая со старой, топологической, размерностью на идеальных объектах, новая размерность обладала более тонкой чувствительностью к несовершенствам реальных объектов, позволяя различать и индивидуализировать то, что прежде было безлико и неразлично. Так, отрезок прямой, отрезок синусоиды и самый причудливый меандр неразличимы с точки зрения топологической размерности - все они имеют топологическую размерность, равную единице, тогда как их размерность Хаусдорфа - Безиковича различна и позволяет числом измерять степень извилистости. Но самое важное в этой размерности, что она способна принимать не только целые, как топологическая размерность, но и дробные значения.

Равная единице для прямой (бесконечной, полубесконечной или для конечного отрезка), размерность Хаусдорфа - Безиковича увеличивается по мере возрастания извилистости, тогда как топологическая размерность упорно игнорирует все изменения, происходящие с линией, если только они не сопровождаются разрывом или склеиванием каких-то точек. При этом, увеличивая свое значение, размерность Хаусдорфа - Безиковича не меняет его скачком, как сделала бы на ее месте топологическая размерность; она принимает дробные значения: равная единице для прямой, она становится равной 1,02 для слегка извилистой линии, 1,15 - для более извилистой, 1,53 - для очень извилистой и т.д. Для того чтобы особо подчеркнуть способность размерности Хаусдорфа - Безиковича принимать дробные, нецелые, значения, Мандельброт и придумал свой неологизм, назвав ее фрактальной размерностью. Итак, фрактальная размерность (не только Хаусдорфа - Безиковича, но и любая другая) - это размерность, способная принимать не обязательно целые значения, фрактал - объект с фрактальной, размерностью, а фрактальность - свойство объекта быть фракталом или размерности быть фрактальной.

Многие объекты, построенные математиками, оказались фракталами, т. е. объектами с дробной, или фрактальной, размерностью Хаусдорфа - Безиковича. Все они очень красивы и часто носят поэтические названия: канторовская пыль, кривая Пеано, снежинка фон Коха, ковер Серпинского и т.д. И все они обладают одним очень важным свойством, которое роднит их с самой обыкновенной прямой. Это свойство называется самоподобием: все эти фигуры подобны любому своему фрагменту. Если вам дадут исходный снимок какого-то фрактального объекта, и снимок, его же, но увеличенный в какое-то число раз, то вы не сможете найти между ними какой-либо разницы.

Так как фрактал состоит из бесконечного числа повторяющихся элементов, невозможно точно измерить его длину. Это означает, что чем более точным инструментом мы будем его измерять, тем большей окажется его длина. В то время как гладкая евклидова линия заполняет в точности одномерное пространство, фрактальная линия выходит за пределы одномерного пространства, вторгаясь в двумерное. Поэтому фрактальная размерность кривой Коха или «колбасы» Минковского находится между 1 и 2.

Фрактальное самоподобие (скейлинг) повторение фракталом самого себя на разных масштабных уровнях, т. е. неизменность закона построения фрактала.

Самоподобный объект — объект, в точности или приближённо совпадающий с частью себя самого (то есть целое имеет ту же форму, что и одна или более частей). Многие объекты реального мира, например, береговые линии, обладают свойством статистического самоподобия: их части статистически однородны в разных шкалах измерения. Самоподобие есть характеристическое свойство фрактала. Инвариантность относительно изменения шкалы является одной из форм самоподобия, при которой при любом приближении найдётся по крайней мере одна часть основной фигуры, подобная целой фигуре.

Самоподобный объект выглядит неизменным и после увеличения и после уменьшения его размеров. Многие законы не зависят от масштаба. Тем не менее скейлинг имеет предел: постоянную Планка, когда объекты становятся слишком малыми, или скорость света - когда объекты движутся слишком скоро. В некотором смысле самоподобие - это тоже периодичность, только в логарифмической шкале.

Все фракталы, обладающие хотя бы какой-нибудь симметрией, самоподобны.

Самоподобие означает, что у объекта нет характерного масштаба: будь у него такой масштаб, вы сразу бы отличили увеличенную копию фрагмента от исходного снимка. Самоподобные объекты обладают бесконечно многими масштабами на все вкусы. Разумеется, далеко не все фракталы обладают столь правильной, бесконечно повторяющейся структурой, как объекты рождённые фантазией математиков и художников. Многие фракталы, встречающиеся в природе (поверхности разлома горных пород и металлов, облака, турбулентные потоки, пена, гели, контуры частиц сажи и т.д.), лишены геометрического подобия, но упорно воспроизводят в каждом фрагменте статистические свойства целого. Такое статистическое самоподобие, или самоподобие в среднем, выделяет фракталы среди множества природных объектов. Даже простейшие из фракталов - геометрически самоподобные фракталы - обладают непривычными свойствами. Например, снежинка фон Коха обладает периметром бесконечной длины, хотя ограничивает конечную площадь. Кроме того, она такая колючая, что ни в одной точке контура к ней нельзя провести касательную (снежинка фон Коха нигде не дифференцируема).

Не менее необычна и физика фракталов. Фрактальные среды обладают настолько сложной геометрией, что многие процессы протекают в них не так, как в обычных сплошных средах. Изучая их фракталы, мы учимся различать и предсказывать важные особенности окружающих нас предметов и явлений, которые прежде, если и не игнорировались полностью, то оценивались лишь приблизительно, качественно, на глаз. Например, сравнивая фрактальные размерности сложных сигналов, энцефалограмм или шумов в сердце, медики могут диагностировать некоторые тяжелые заболевания на ранней стадии, когда больному еще можно помочь. Барабан, натянутый на гладкий или фрактальный контур, звучит по-разному, и это различие можно использовать для диагностики характера контура и определения его фрактальной размерности. Метеорологи научились определять по фрактальной размерности изображения на экране радара скорость восходящих потоков в облаках, что позволяет с большим упреждением выдавать морякам и летчикам штормовые предупреждения. Такого рода применений фракталов уже сейчас существует великое множество, и число их все увеличивается.

Свойство самоподобия коренным образом отличает фракталы от объектов геометрии Евклида. Действительно, возьмём такой объект, как график дифференцируемой функции. Если мы направим микроскоп в какую-то точку этого графика, то при увеличении изображения увидим прямую линию - касательную в этой точке. Классические объекты упрощаются при увеличении изображения, в "малом" они линейны (прямая, плоскость и т.д.). Фракталам же присуща "внутренняя бесконечность" - производные в каждой точке обращаются в бесконечность.

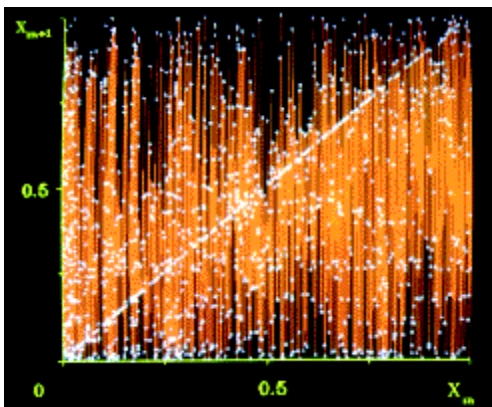


Рис. 2. Функция Вейерштрасса. Всюду непрерывная, нигде не дифференцируемая: производные в каждой точке обращаются в бесконечность.

У фракталов есть одно важное общее свойство: степень изрезанности или сложности их структуры может быть измерена неким характеристическим числом — фрактальной размерностью D .

Фракталы бывают одномерными, двумерными и трёхмерными. Типичным примером одномерного фрактала является канторово множество, на основе

которого стоит фрактал - канторова пыль.

Канторово множество — один из простейших фракталов, подмножество единичного отрезка вещественной прямой. Описано в 1883 г. Кантором.



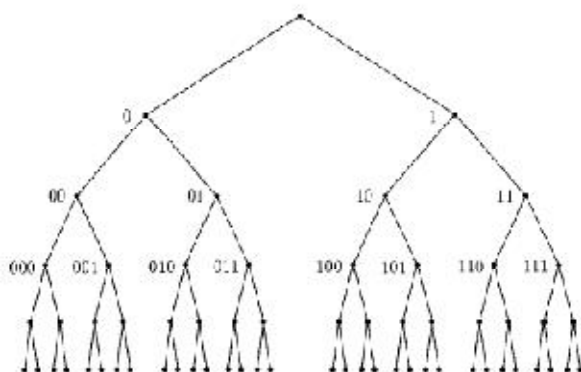
Рис. 3. Построение канторова множества.

Канторово множество имеет топологическую размерность 0, промежуточную, т.е. не целую) Хаусдорфову размерность равную $\ln 2 / \ln 3 \approx 0,63$, нулевую меру Лебега.



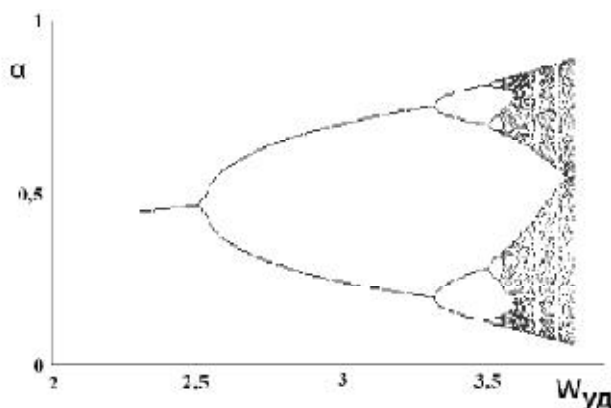
Рис. 4. Построение канторовой пыли на квадрате.

Канторова пыль относится к фрактальному множеству с $D < 1$. В математике его основой является уравнение Ферхюста и логистическое уравнение, описывающее рост популяции животных. Построение канторовской пыли аналогично кривой Коха, с тем отличием, что на n -м



шаге осуществляется не добавление, а удаление n интервалов длиной $L_n = (2/3)n$, в соответствии с этим длина оставшегося множества составляет $D = \ln 2 / \ln 3 = 0,631$ а каждое звено l_n остается тем же, что и в фигуре Коха. "Канторова пыль" представляет образование, промежуточное между точкой и линией. Процедура построения канторовского множества может быть представлена иерархическим деревом Кейли (рис.).

Рис. 5. Дерево Кейли.



Для рассматриваемой в данном курсе лекций идеологии, важно, что удвоение периода роста является сценарием перехода от порядка к хаосу.

Рис. 6. Образование канторовой пыли (хаоса) совместно с бинарным лексикографическим деревом.

Рассмотрение фрактальной размерности начнём с примера регулярных, самоподобных фракталов. Рассмотрим сначала отрезок единичной длины, который разбит на N равных кусков длиной b , так что $N = 1/b$. По мере уменьшения b значение N растёт линейно, что и следовало ожидать для одномерной кривой. Аналогично, если мы разделим квадрат единичной площади на N равных квадратиков со стороной b , то получим $N = 1/b^2$ - ожидаемый для двумерного объекта результат. Можно утверждать, что в общем случае $N = 1/b^D$, где D размерность объекта. Логарифмируя обе части этого равенства, выразим размерность в виде

$$D = \frac{\log N}{\log \left(\frac{1}{b} \right)}, \quad (5)$$

которая не зависит от основания логарифма.

Теперь применим эти соображения к **кривой Коха**. На каждой стадии формирования этой кривой замена средней трети каждого сегмента производится в направлении, которое увеличивает площадь под кривой. Можно увидеть, что при каждом уменьшении длины b в три раза число сегментов увеличивается в четыре раза. Таким образом имеем $N = 4$ и $b = 1/3$, и фрактальная размерность треугольной кривой Коха равна $D = \ln 4 / \ln 3 = 1,2618...$

В триадной кривой Коха (предложена Хельге фон Кохом в 1940 г.) ни в одной точке нельзя провести касательную. Построение кривой начинается с отрезка единичной длины (рис.1) - это 0-е поколение кривой Коха. Далее каждое звено (в нулевом поколении один отрезок) заменяется на образующий элемент, обозначенный на рис. 6 через $n=1$. В результате такой замены получается следующее поколение кривой Коха. В 1-ом поколении - это кривая из четырех прямолинейных звеньев, каждое длиной по $1/3$. Для получения 3-го поколения продельваются те же действия - каждое звено заменяется на уменьшенный образующий элемент. Итак, для получения каждого последующего поколения, все звенья предыдущего поколения необходимо заменить уменьшенным образующим элементом. Кривая n -го поколения при любом конечном n называется предфракталом. На рис. 7 представлены пять поколений кривой. При n стремящемся к бесконечности, кривая Коха становится фрактальным объектом.

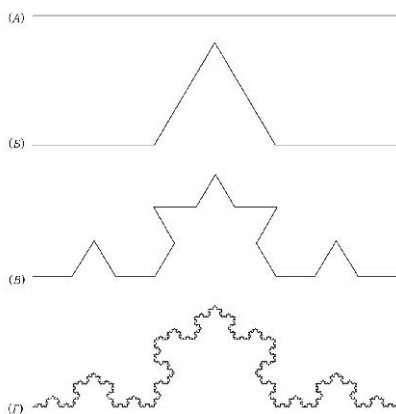


Рис. 7. Построение кривой Коха.

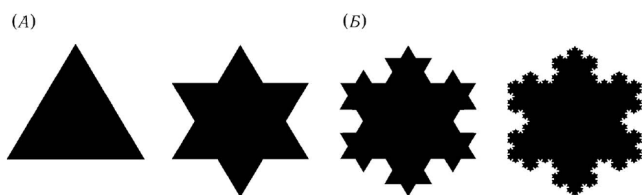


Рис. 8. Инициатор и генератор для снежинки Коха (А) и промежуточные стадии построения снежинки фон Коха.

Применив генератор фон Коха к равностороннему треугольнику и закрасив внутренность построенной фигуры в чёрный цвет, получим сплошную звезду Давида (рис. 8А). Бесконечная итерация такого построения приводит к снежинке фон Коха (рис. 8Б). После n итераций периметр снежинки становится в $(4/3)^n$ раз больше периметра исходного треугольника. При n , стремящемся к бесконечности, периметр снежинки становится бесконечно большим. Следовательно, длина перестаёт быть удобной величиной для количественной характеристики периметра. Необходимо ввести какую-то новую меру, которая позволила бы различать фракталы, порождаемые различными генераторами.

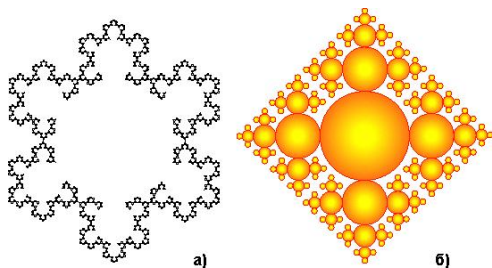


Рис. 9. Фигуры Коха, построенные из шестиугольников и окружностей.

Табл.1. Конструкции производящих фрактальных форм.

1)Кривая Коха(треугольная)		$D_G = \log 4 / \log 3 = 1.2618...$ $N=4, b=1/3$
2) Видоизменённая кривая Коха (прямоугольная)		Единичный сегмент имеет три отрезка длиной $1/3$. два отрезка длиной $1/4$. Из соотношения $3(1/3)^D + 2(1/4)^D = 1$ $D_G = 1.34.$
3) Видоизменённая кривая Коха (меандр)		$D_G = \log 8 / \log 4 = 3/2$ $N=8, b=1/4$
4) Канторовская пыль		$D_G = \log 2 / \log 3 = 0,6309...$ $N=2, b=1/3$
5) Дерево		$D_G = \log 5 / \log 3 = 1,465...$ $N=5, b=1/3$
6) Снежинка		$D_G = \log 3 / \log (3)^{1/2} = 2$ $N=3, b=1/(3)^{1/2}$
7) Прокладка Серпинского		$D_G = \log 3 / \log 2 = 1,585...$ $N=3, b=1/2$

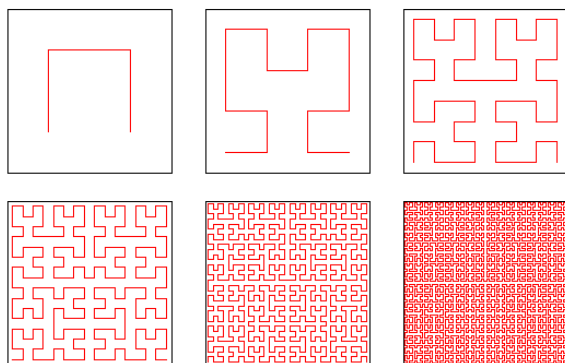


Рис. 10. Пример кривой Пеано, построенный Гильбертом. Здесь показан порядок обхода квадратиков 1-6 уровня.

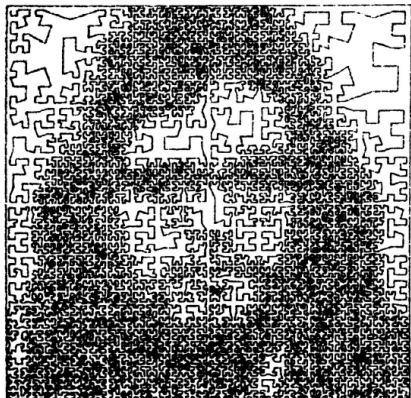


Рис. 11. Деформированная кривая Гильберта: точка зрения художника.

В Табл. 1 производящих форм в п.6 представлена треугольная снежинка. Формообразование шестиугольной снежинки Кеплера строится продолжением трёх лучей исходной треугольной снежинки. Следует обратить внимание, что при этом все пушинки этой снежинки от центра направлены наружу, как иголки на еловой ветке. Это свидетельствует о том, что формообразующая сила сосредоточена в центре снежинки и действует оттуда одинаково по всем направлениям. Фрактальная размерность снежинки Кеплера: $\frac{\log 6}{\sqrt{\log 3}} = 3,262$

Интересно, что при $D_H=2$ мы не обязательно получим двумерную фигуру: вполне достаточно оказывается топологически одномерного объекта – линии. Известным примером может служить асимптотически самоподобная кривая Гильберта (рис. 10), проходящая сколь угодно близко от любой точки единичного квадрата. Она строится на кривой Пеано.

Кривая Пеано – общее название для параметрических кривых, образ которых содержит квадрат (или, в более общем смысле, открытые области пространства).

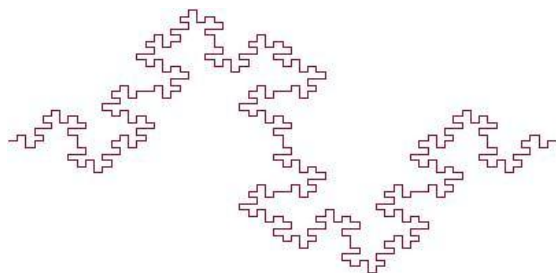


Рис. 12. Кривая Минковского.

Окончательный результат самоподобен: раздвиг любой подквадрат в 2^n раз, мы получим кривую в точности похожую на всю кривую.

Поскольку n -поколение кривой Гильберта состоит из $2^{2n}-1$ звеньев длиной $1/2^n$, её размерность Хаусдорфа равна 2, как и подобает кривой, заполняющей плоскую фигуру. На рис. 9 представлен вариант кривой Гильберта, рожденный фантазией художника.

Классическим геометрическим фракталом является **кривая** (колбаса) Минковского. Инициатором является отрезок, а генератором – ломаная из восьми звеньев (два равных звена продолжают друг друга) – см. рис. 10. Кривая Минковского нигде не дифференцируема и не спрямляема, не имеет самопересечений, имеет Хаусдорфову размерность $\ln 8 / \ln 4 = 3/2 = 1,5$ (поскольку она состоит из восьми равных частей, каждая из которых подобна всей кривой с коэффициентом подобия $1/4$). В частности, кривая Минковского имеет нулевую меру Лебега.

Интересным примером автоподобной кривой является “кривая дракона”, придуманная Э.Хейуэем. Для ее построения возьмем отрезок, повернем его на 90° вокруг одной из вершин и добавим полученный отрезок к исходному. Получим угол из двух отрезков. Повторим описанную процедуру. Повернем угол на 90° вокруг вершины и добавим полученную ломаную к исходной (рис. 11). При построении следующих поколений выполняется правило: самое первое слева звено заменяется на образующий элемент так, чтобы середина звена смещалась влево от направления движения, а при замене следующих звеньев, направления смещения середин отрезков должны чередоваться. На рис. представлены несколько первых поколений и 11-е поколение кривой, построенной по вышеописанному принципу. Предельная фрактальная кривая (при n стремящемся к бесконечности) называется **драконом Хартера-Хейтуэя**.

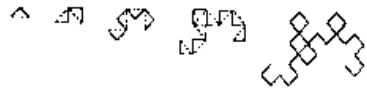


Рис. 13. Построение "дракона" Хартера-Хейтуэя



Линейный алгоритм построения фрактала можно представить в виде копировальной машины со многими редукторами, способными многократно уменьшать исходное изображение. Эта машина действует так же, как и обыкновенная копировальная машина, обладающая возможностью уменьшать или увеличивать изображение, но отличается тем, что имеет несколько уменьшающих линз, каждая из которых может копировать вводимое в машину изображение. Линзы могут настраиваться на различную степень уменьшения, и уменьшенные изображения могут помещаться в любое место. Таким образом, изображение может перемещаться, сжиматься, отражаться, вращаться и трансформироваться произвольным образом при условии, что прямые линии на изображении остаются прямыми после преобразования.



Рис. 14. Сетевая копировальная машина может строить составные фрактальные изображения, такие, как папоротник, состоящий из треугольников Серпинского. Несколько машин соединены в систему и работают параллельно: первая создаёт треугольники Серпинского, вторая располагает треугольники в листья, а третья строит общую форму папоротника (слева). Отметим, что листья попеременно ответвляются от главного стебля то влево, то вправо; треугольники на листьях ориентированы в противоположных направлениях (справа).

Способ, которым изображение перемещается и сжимается, определён алгоритмом. С помощью механизма обратной связи изображение подвергается многократной обработке, в процессе которой постепенно возникает фрактальная форма.

Одним из примеров фрактала, полученного при помощи такого алгоритма с обратной связью (рекурсивного алгоритма), является треугольник Вацлава Серпинского (1916 г.), который обладает свойством самоподобия: каждая часть фигуры, сколь бы малой она ни была, содержит изображение, которое в увеличенном виде воспроизводит целый треугольник Серпинского.

Треугольник Серпинского строится копировальной машиной со многими редукторами следующим образом. Изображение помещается в машину, уменьшается наполовину и копируется три раза, по одной копии в каждой вершине равностороннего треугольника. В результате получается триада. При повторении описанной процедуры триада, полученная на предыдущем шаге, снова уменьшается наполовину и копируется три раза и т.д. Уже после шести копирований,

или итераций, начинает проступать окончательная форма, которая называется предельным изображением, поскольку оно является окончательным результатом бесконечно повторяющегося цикла копировальной машины. Предельное изображение можно довольно быстро определить путем оценки, но его невозможно достичь в рамках самого процесса.

Предельное изображение не зависит от исходного изображения. Например, в качестве исходного изображения можно взять слово FRACTAL. После шести шагов копирования исходное изображение станет уже практически невидимым, но зато в явном виде начнёт обнаруживаться форма треугольника Серпинского. С каждым новым циклом копирования первоначальное слово FRACTAL будет всё более неразборчивым.

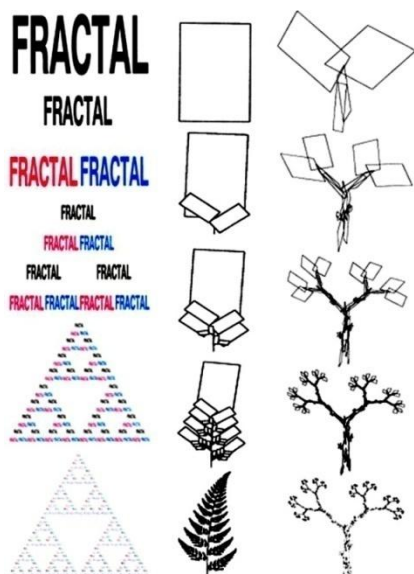


Рис. 15. Фрактальные изображения, генерируемые многократно копировальной машиной с обратной связью, зависят лишь от запрограммированной процедуры копирования.

Слово *FRACTAL* (рис.15) трансформируется программой,

которая уменьшает изображение вдвое и копирует его три раза: по одной копии в каждой вершине равностороннего треугольника. Результирующее изображение представляет собой треугольник Серпинского (*слева*). Несколько более замысловатые преобразования такого же рода порождают фрактал в форме листа папоротника (*в центре*) или фрактального дерева (*справа*). Любое исходное изображение, пропущенное через копировальную машину, даст один и тот же результат. Достаточно нескольких чисел, определяющих правила копирования (*вверху*), чтобы описать изображение, которое потребовало бы сотен тысяч чисел для его представления обычно применяющимися средствами.

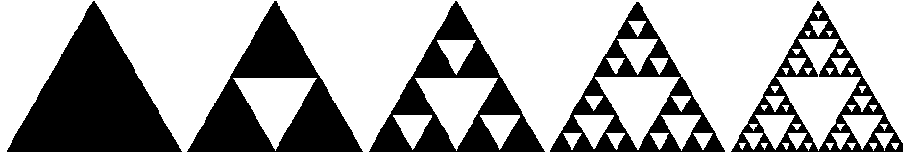


Рис. 16. Этапы построения треугольника Серпинского.

Известным примером фрактала является Ковёр Серпинского (квадрат Серпинского) — один из двумерных аналогов множества Кантора, который имеет топологическую размерность $=1$, промежуточную (т. е. не целую) Хаусдорфову размерность $\ln 8 / \ln 3 \approx 1,89$ и нулевую меру Лебега.

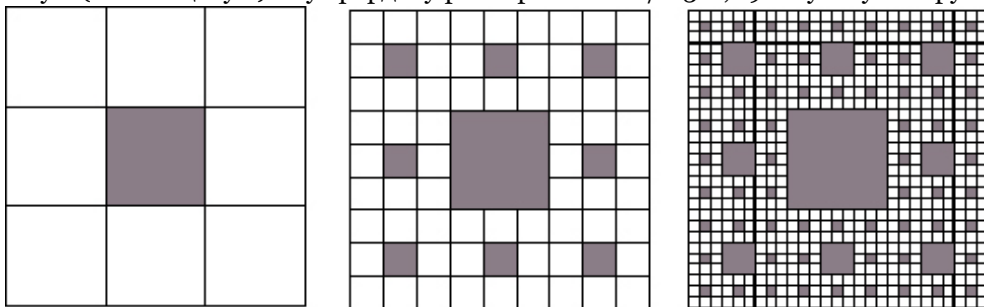


Рис. 17. Построение ковра Серпинского.

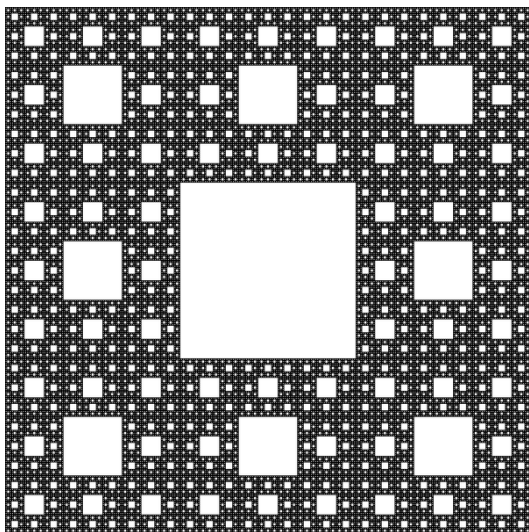


Рис. 18. Ковёр Серпинского.

Самоподобная фигура Серпинского получается из квадрата последовательным вырезанием срединных квадратов. А именно, разделим данный квадрат на девять равных квадратов и срединный квадрат вырежем. Получим квадрат с дыркой (рис. 17). Для оставшихся восьми квадратов повторим указанную процедуру. Разделим каждый из них на девять равных квадратов и срединные квадраты вырежем. Повторяя эту процедуру, будем получать все более дырявую фигуру. То, что остаётся после всех вырезаний, и будет искомым ковром Серпинского (рис. 18).

Отметим, что поскольку вырезаемые квадраты располагаются все более часто, то в результате на ковре Серпинского не будет ни одного, даже самого маленького, квадрата без дырки.

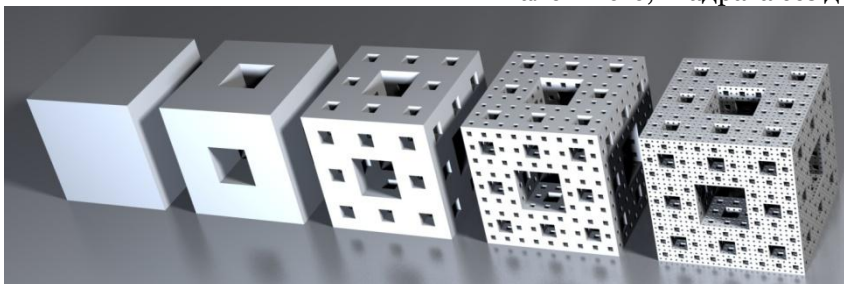
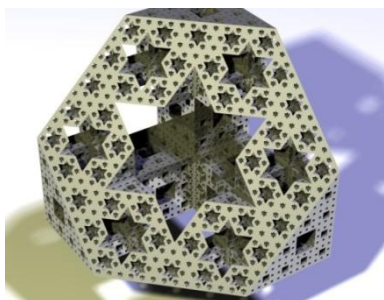


Рис. 19. Построение на основе ковра Серпинского (размерность $D \approx 1,8928$) строится губка Менгера ($D=2,7268$).

Вычислим площадь ковра Серпинского, считая исходный квадрат единичным. Для этого достаточно вычислить площадь вырезаемых квадратов. На первом шаге вырезается квадрат

площади $1/9$. На втором шаге вырезается восемь квадратов, каждый из которых имеет площадь $1/81$. На каждом следующем шаге число вырезаемых квадратов увеличивается в восемь раз, а площадь каждого из них уменьшается в девять раз. Таким образом, общая площадь вырезаемых квадратов представляет собой сумму геометрической прогрессии с начальным членом $1/9$ и знаменателем $8/9$. По формуле суммы геометрической прогрессии находим, что это число равно единице, т.е. площадь ковра Серпинского равна нулю.



Если рассечь губку Менгера под одним интересным углом, то неожиданно получается фрактальная гексаграмма (звезда Давида, рис. 18).

Рис. 20. Одно из сечений губки Менгера.

Салфетка Серпинского также может быть обобщена на трёхмерное пространство (рис. 19).

Теперь обратимся к другому семейству фрактальных языков, их нелинейным диалектам. Один из них, так называемый квадратичный диалект порождает большое разнообразие геометрических форм с помощью довольно простого алгоритма, тесно связанного с современной теорией хаоса. Теория, лежащая в основе квадратичного диалекта, впервые была описана в 1918 году французским математиком Гастоном Жюлиа. Он занимался изучением комплексных чисел; как известно, комплексное число состоит из действительного числа и мнимой части, содержащей в качестве множителя мнимую единицу $i=\sqrt{-1}$. Комплексные числа обычно отображаются на плоскости с перпендикулярными координатными осями, одна из которых представляет действительные числа, а другая мнимые. Жюлюа интересовал вопрос, что будет с последовательностью точек z_k , на комплексной плоскости, если они порождаются преобразованием $q(z)=z^2+c$. Каждая новая точка z_{k+1} получается подставлением предыдущей точки z_k в приведённую формулу преобразования. Комплексное число c является управляющим параметром, который можно выбирать произвольным образом. Этот несложный процесс с обратной связью порождает потрясающее многообразие форм.

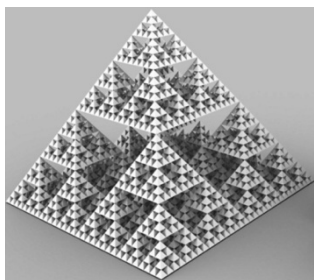


Рис. 21. Обобщение треугольника Серпинского в трёхмерное пространство.

Когда исходная точка z_0 подвергается преобразованию, то получающаяся последовательность демонстрирует поведение двух типов. Она либо свободно путешествует по плоскости, постепенно уходя в бесконечность, либо оказывается замкнутой в определённой области комплексной плоскости. Первые из них образуют множество «беглецов», те же, что остаются в замкнутом пространстве, принадлежат множеству «пленников». Исходная точка z_0 , выбранная из множества пленников, генерирует последовательность, которая остаётся в численной неволе, независимо от того, сколько поколений этой последовательности вычисляется. Форма этой «тюрьмы» зависит от выбранного значения параметра c . Для точки z_0 , лежащей вне замкнутой области, последовательность z_k удаляется от центра плоскости и уходит в бесконечность. Множество пленников и множество беглецов отделены друг от друга бесконечно тонкой границей, известной как множество Жюлиа (см. рис. 5).

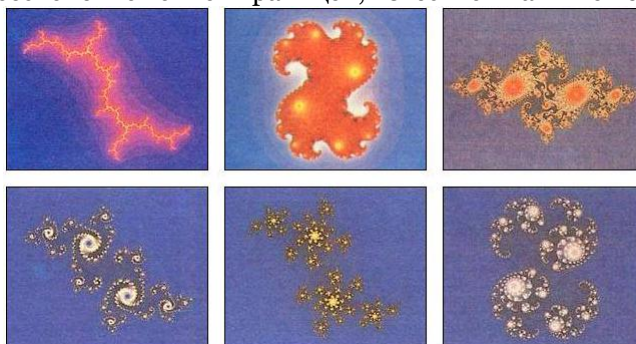


Рис. 22. Множества Жюлиа — это фрактальные границы, возникающие в результате итерирования квадратичного преобразования z^2+c . Они принимают разнообразные и удивительные формы, которые зависят только от числа c , называемого управляющим параметром. Некоторые значения c порождают множества Жюлиа, имеющие одно связное тело (*вверху*), при других значениях c эти множества распадаются на фрагменты и рассыпаются подобно пылинкам (*внизу*). Множество Мандельброта состоит из всех точек c , которые ассоциируются со связными множествами Жюлиа; оно служит также «оглавлением» для множеств Жюлиа.

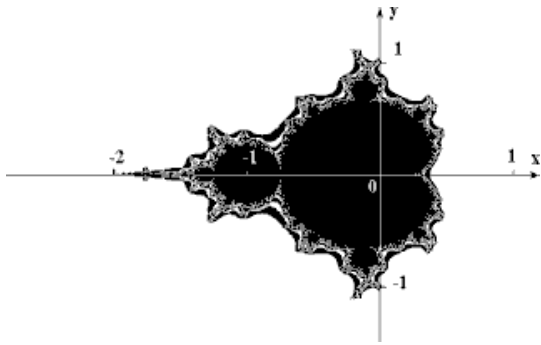


Рис. 23. Множество Мандельброта.

Алгоритм построения множества Мандельброта (относится к алгебраической группе) достаточно прост и основан на простом итеративном выражении:

$$Z[i+1] = Z[i] \cdot Z[i] + C, \quad (6)$$

где Z_i и C - комплексные переменные. Итерации выполняются для каждой стартовой точки C прямоугольной или квадратной области - подмножестве комплексной плоскости. Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока $Z[i]$ не выйдет за пределы окружности радиуса 2, центр которой лежит в точке $(0,0)$, (это означает, что аттрактор динамической системы находится в бесконечности), или после достаточно большого числа итераций (например, 200-500) $Z[i]$ сойдется к какой-нибудь точке окружности.



Рис. 24. Участок границы множества Мандельброта, увеличенный в 200 раз.

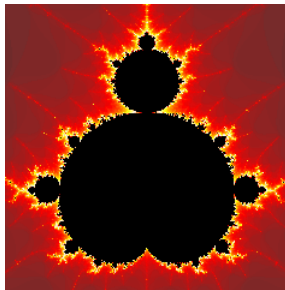


Рис. 25. Множество Мандельброта - классический образец алгебраического фрактала.

Каждая часть множества Мандельброта характеризует соответствующее семейство множеств Жюлиа. Например, основное сердцевидное тело множества Мандельброта характеризует множества Жюлиа, которые выглядят как смятые окружности. Хотя множество Мандельброта, строго говоря, не является самоподобным, как треугольник Серпиньского и фрактальный папоротник, оно обладает сходным свойством: увеличение границы области обнаруживает бесконечное число крошечных копий множества (рис. 26). Всё богатство форм и структур множества Мандельброта проявляется лишь при таком детальном его исследовании.

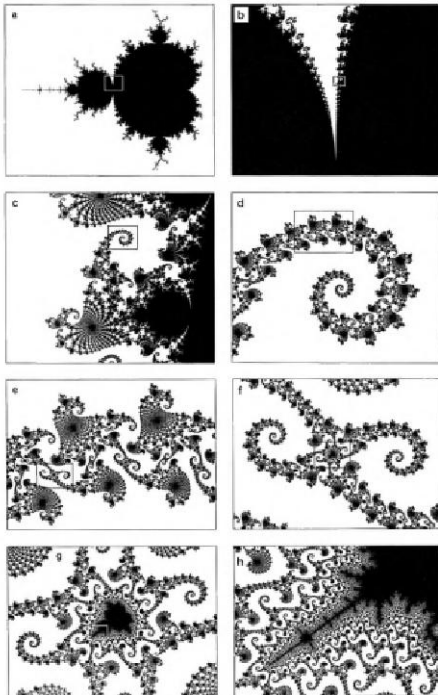


Рис. 26. Множество Мандельброта на нескольких масштабах.

Все рассмотренные выше фракталы можно считать детерминированными. Хотя случайные процессы (такие, как бросание игральной кости) иногда и помогают генерировать фрактальные изображения, они не оказывают никакого влияния на окончательную форму фрактала. Совершенно иная ситуация имеет место в отношении другого класса фракталов, а именно так называемых случайных фракталов. Стохастические фракталы получаются, если в итерационном процессе случайным образом менять какие-либо его параметры. При этом получаются объекты очень похожие на природные - несимметричные деревья, изрезанные береговые линии и т.д. Двумерные стохастические фракталы используются при моделировании рельефа местности и поверхности моря.

Один из фракталов такого типа может начинаться с треугольника, лежащего в произвольной плоскости. Средние точки сторон треугольника соединены между собой, так что треугольник оказывается разделённым на четыре меньших треугольника. Затем каждая средняя точка сдвигается вверх или вниз на определённую, случайно выбираемую величину. Тот же процесс применяется к каждому из меньших треугольников, затем к ещё меньшим и так далее до бесконечности. После достаточно большого количества итераций начинает возникать всё более детализированная поверхность.

В этом методе смещения средних точек случайные величины для перемещения средних точек вверх или вниз управляются определённым законом распределения, который тщательно

подбирается, чтобы получить близкую аппроксимацию желаемой поверхности. Для того чтобы поверхность была относительно гладкой, в преобразованиях следует встроить правило, согласно которому величина смещения средних точек должна становиться очень малой уже после нескольких первых итераций. Такое правило позволяет добавлять лишь небольшие «кочки» к общим очертаниям ландшафта. Для представления изрезанной поверхности, характерной, скажем, для горного хребта или береговой линии, более подходящим будет правило медленного уменьшения смещений после каждого шага итерационного процесса.



Рис. 27. Трёхмерное представление множества Мандельброта: электрический потенциал, окружающий заряженное множество Мандельброта. Может использоваться как иллюстрация бухты со скалистыми берегами.



Рис. 28. Множество Мандельброта отражает порядок, лежащий в основе бесконечного многообразия множеств Жюлиа. Каждая точка множества Мандельброта представляет значение параметра s , порождающего связанное множество Жюлиа. Если точка s лежит вне множества Мандельброта, то ассоциированное с ней множество Жюлиа несвязно. Множество Мандельброта содержит в себе невероятное богатство мельчайших деталей. Три последовательных увеличения фрагментов (отмечены квадратиками) позволяют увидеть подобные повторяющиеся структуры множества Мандельброта с добавлением многих новых и прежде не повторяющихся элементов. Если всё множество изобразить в масштабе, в котором представлен фрагмент на крайнем правом рисунке, то оно заняло бы площадь, на которой уместилось бы 100 футбольных полей.

У данного метода построения поверхностей существует много приложений. Он применялся, в частности, в качестве модели эрозии почвы, для анализа сейсмических явлений, чтобы лучше понять характер изменений в зоне разломов, для построения изображений планет, спутников, облаков и горных хребтов, которые выглядят весьма реалистично (см. рис. 8).

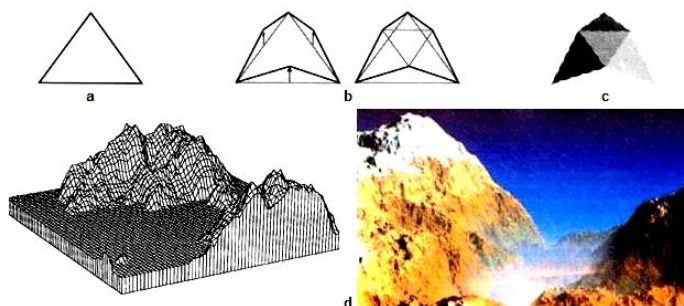


Рис. 29. Фрактальные ландшафты могут создаваться из фракталов методом случайного смещения средней точки.

Средние точки сторон треугольника (a) смещаются вверх или вниз от плоскости изображения и соединяются с вершинами (b). При этом возникает четыре меньших треугольника, к которым повторно применяется та же процедура. Функция распределения вероятности определяет величину смещения и, следовательно, степень гладкости фрактального ландшафта. Затем графическая программа компьютера закрашивает треугольники, создавая различные оттенки (c). В результате получается весьма реалистичная картина (d).

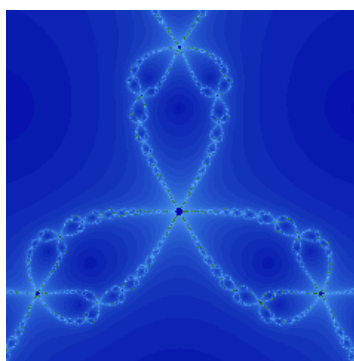


Рис. 30. Бассейны Ньютона.

Бассейны Ньютона также являются примерами алгебраических фракталов. Области с фрактальными границами появляются при приближенном нахождении корней нелинейного уравнения алгоритмом Ньютона на комплексной плоскости (для

функции действительной переменной метод Ньютона называют *методом касательных*, который обобщается для комплексной плоскости).

Огромный интерес к фракталам связан с тем, что они внешне сильно напоминают природные объекты (см., например, рис. 31).



Рис. 31а. Растения

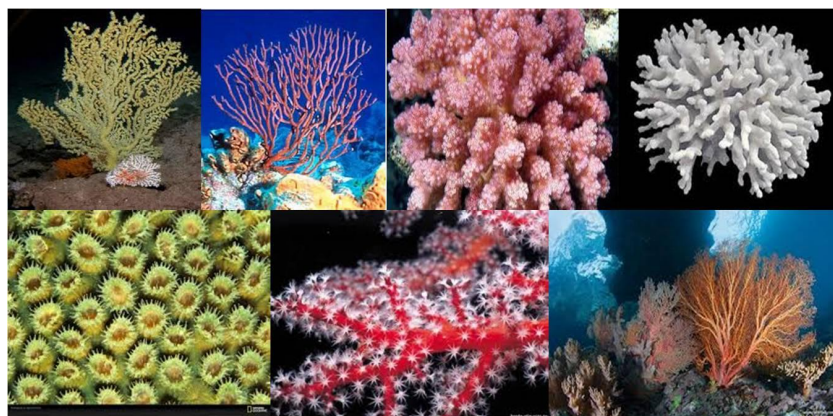


Рис. 31б. Кораллы



Рис. 31в. Некоторые органы человека.



Рис. 31г. Узоры на стекле.



Рис. 31д. Дендриты.



Рис. 31е. Молнии.



Рис. 31ж. Волны.

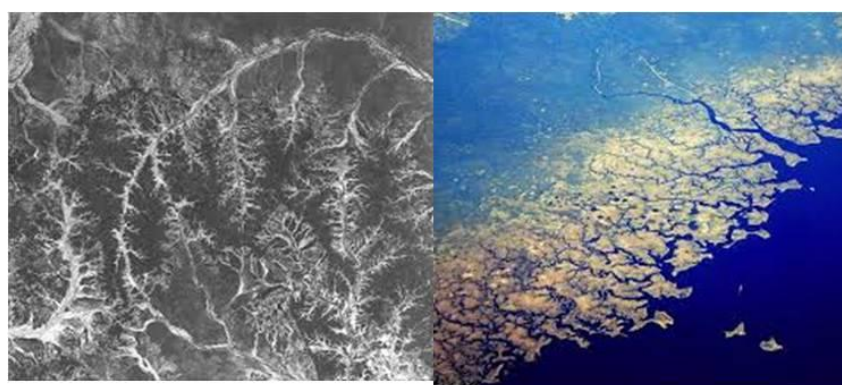


Рис. 31з. Долина реки и побережье.



Рис. 31и. Горы.



Рис. 31к. Облака.

Интересно сравнить эти фото и картинами, получаемыми расчётами на компьютере в использовании геометрии фракталов (рис. 32). Сходство довольно очевидно. Поэтому можно ожидать, что фракталы позволят дать математическое описание намного более широкого класса природных объектов, чем это позволяют геометрии Эвклида, Римана и Лобачевского. Действительно, примеров применения фракталов уже сейчас довольно много. Мы остановимся только на нескольких примерах

Рассмотрим проблему анализа извилистости береговой линии (рис. 33). Линия раздела двух взаимодействующих сред (моря и суши) крайне изломана. Её иногда называют лезвием хаоса. На рис. представлено побережье Норвегии, а на рис. 34 - способ измерения степени гладкости побережья. Прямолинейность графика чётко доказывает, что изучаемый объект - фрактал. По тангенсу угла наклона находим показатель фрактала D .

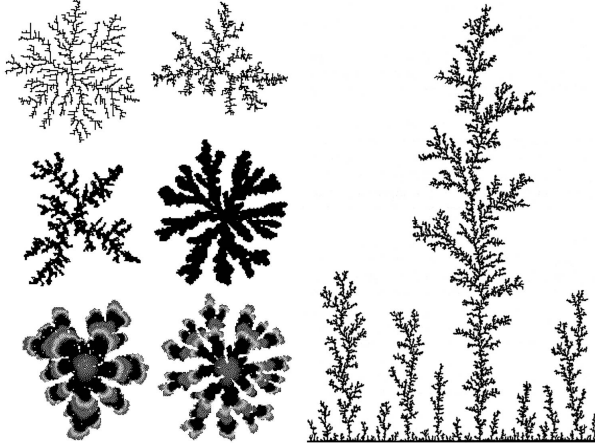


Рис. 32а. Модель дендритов.

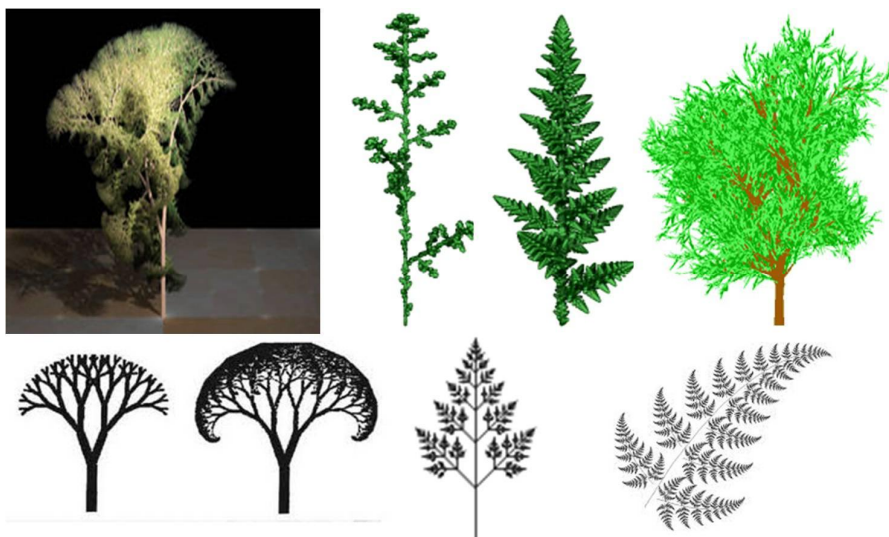


Рис. 32б. Фрактальные деревья.

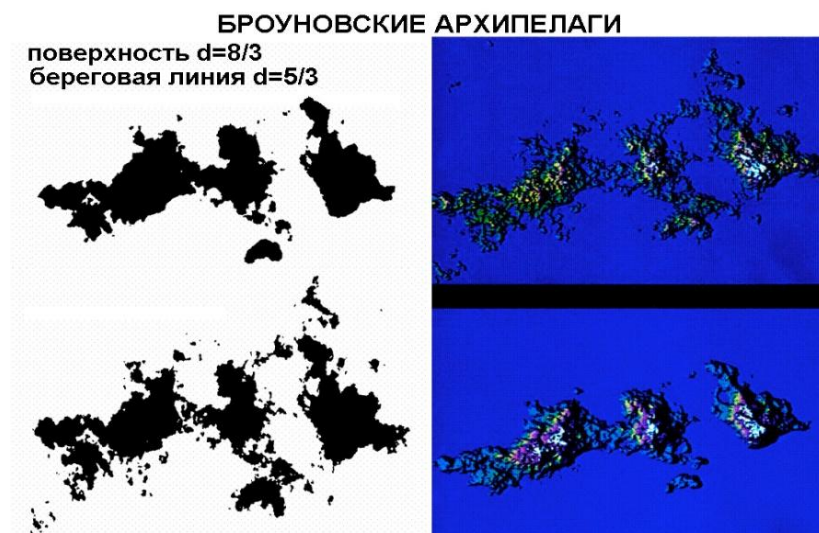


Рис. 32в. Моделирование броуновского движения.

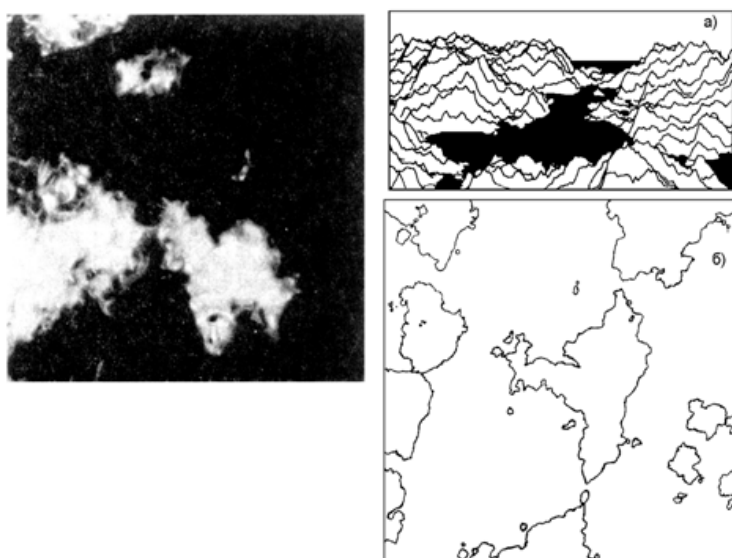


Рис. 32г. Облака и горы с озёрами.

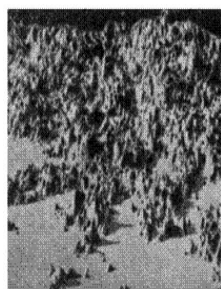


Рис. 32д. Горные пейзажи.

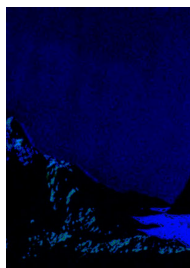


Рис. 32е. Фрактальное моделирование гор и озёр.

Аналогичным образом можно описать побережье и других морей (рис.). Не все они фрактальны, но обычно можно выбрать участки, в которых фрактальность более-менее соблюдается (прямолинейный участок на графиках). По величине показателя фрактала можно судить о наличии бухт, в которых можно укрыться в непогоду (в Белом море их много, а на Каспийском море практически нет). Это важно для безопасности мореходства. Поэтому сейчас во всех логия указаны фрактальные размерности побережий озёр, морей и океанов.



Рис. 33. Карта побережья южной части Норвегии. Береговая линия представлена в цифровом виде с помощью растра, состоящего примерно из 1800*1200. Изображенная сверху квадратная решетка имеет шаг $\delta=50$ км.

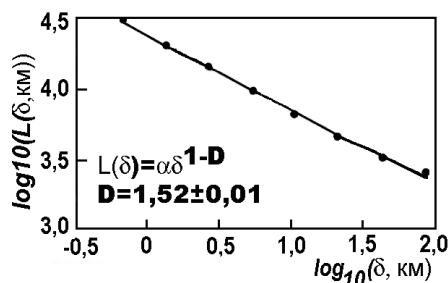


Рис. 34. Измеренная длина береговой линии, изображенной, как функция шага δ (км) – длины стороны $\delta \times \delta$ квадратных ячеек, образующих покрытие береговой линии на карте. Прямая на графике в дважды логарифмическом масштабе соответствует зависимости $L(\delta) = \alpha \delta^{1-D}$, где $D=1,52$.

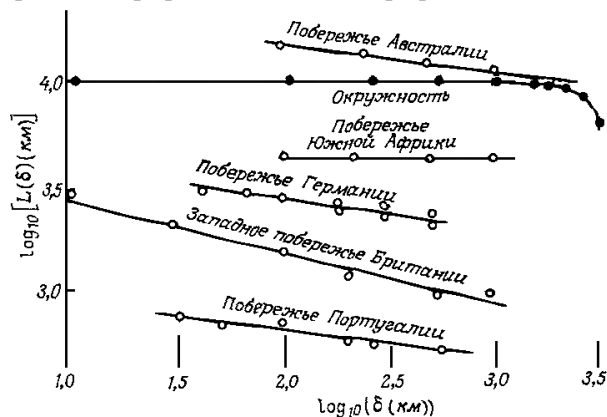


Рис. 35. Длина береговых линий морей как функция выбранного шага δ (км).

Другой сферой широкого применения геометрии фракталов является информатика, сеть Интернет и компьютерные науки. Например, Интернет может быть представлен как масштабная (network) или деревоподобная решётка. В этом пространстве точки являются коастерами, которые в свою очередь представляют из себя масштабно-инвариантные сети (например, сеть Интернет). Кстати, аббревиатура WWW - "всемирная паутина" имеет также смысл Worlds Within Worlds - "миры внутри миров".

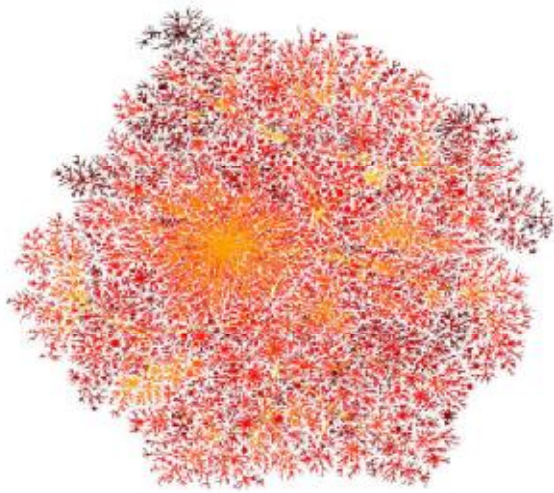


Рис. 36. Масштабно инвариантная сеть.

Применения геометрии фракталов весьма обширны. Их мы обсудим в следующих лекциях.

Лекция 2. КРАСОТА ФРАКТАЛОВ

*Там, где окружающий нас мир перестаёт быть ареной
личных надежд и желаний, где мы как свободные существа,
сомневаясь и размышляя, созерцаем его в изумлении,
там мы вступаем в царство искусства и науки.
Если мы описываем увиденное и известное по опыту
на языке логики – это наука; если же представляем
в формах, внутренние взаимосвязи которых недоступны
нашему сознанию, но которые интуитивно воспринимаются
как осмысленные – это искусство. И для искусства и для науки
общим является увлечение чем-то стоящим выше личного,
свободным от условного.
А. Эйнштейн*

*Искусство - это ложь, позволяющая узнать истину.
Пабло Пикассо.*

Наука и искусство - два дополняющих друг друга способа познания природы, аналитический и интуитивный. Долгое время мыслители пытались свести сложность природных явлений к небольшому числу фундаментальных законов. Однако, в конце концов обнаружилось, что недостаточно открыть основные законы и понять, как работает мир "в принципе". Важно выяснить каким способом эти принципы проявляют себя в реальности, понять, как именно фундаментальные законы действуют не в идеальном, а в реальном мире. А в реальности любой нелинейный процесс приводит к ветвлению, к развилке на пути, в которой система может выбрать ту или иную ветвь. Предсказать последствия выбора решений невозможно (см. курс лекций И.Н. Бекмана "Риск"), поскольку для каждого из этих решений характерно усиление. Самые незначительные неточности раздуваются и имеют далеко идущие последствия. В каждый отдельный момент причинная связь сохраняется, но после нескольких ветвлений она не видна. Рано или поздно начальная информация о состоянии системы становится бесполезной. В ходе эволюции любого процесса информация генерируется и запоминается. Законы природы допускают для событий множество различных исходов, но наш мир имеет одну единственную историю.

Компьютер - новое средство познания - позволил увидеть связи и значения, которые до сих пор были скрыты от исследователей. Компьютерная графика резко обогатила наши возможности, подарила фантастические миры, окружила нас искусственными пейзажами, заставляя забыть действительность. Но она же позволила глубже проникнуть в тайны природы. Если раньше учёные были вынуждены упрощать уравнения или вообще отказываться от них, то теперь их суть демонстрируется на экране дисплея. Естественные процессы, представленные графически, можно постичь во всей их сложности, опираясь на нашу интуицию. При этом стимулируются новые идеи, новые ассоциации и у каждого, кто мыслит в образах, пробуждается творческий потенциал.

Фракталы – объекты с дробной размерностью и самоподобием составляют интересный и важный раздел современной математики. Но у них есть ещё одно важное достоинство: они красивы, пропорциональны и "натуральны". Деятели искусства они привлекают сложностью, возникающей из простоты, а также иррационализмом. Они производят впечатление и своей причудливой формой, цветом и красочностью. Не удивительно, что фракталы довольно быстро

вошли в дизайн, живопись, скульптуру, архитектуру и в музыку.

Важно понимать, что фрактальное искусство не является результатом только компьютерной программы; фрактальные образы не являются случайными (в их основе лежат математические правила); не любой фрактальный образ, созданный любителем на компьютере, является произведением искусства; фрактальное искусство является выразительным, творческим, требующим серьезного труда и интеллекта.

В этой лекции мы приведём некоторые примеры использования комплексных динамических систем в музыке, дизайне и живописи.



2.1 Музыка

Изучение художественного, выразимого числом, - важная проблема искусства, в том числе - музыки.

Отношения музыки и математики изучались великими математиками и музыкантами ещё со времён Пифагора. Сегодня этот союз искусства и науки воплотился как в новом музыкальном инструменте – компьютере, так и в компьютерной музыке, основанной на теории алгоритмов. Непосредственными родоначальниками с компьютерной музыки на основе алгоритмов являются композиторы второй половины XX века, пользовавшиеся серийной техникой в композиции (Янис Ксенакис, Леджарен Хиллер и Пьер Булез и др.). Алгоритмом называют строго определенную последовательность действий, приводящую к искомому результату решением любых однородных задач или действий посредством разложения их на точно установленные предписания и последовательность конечного числа элементарных операций. На основе алгоритмов были построены такие музыкальные программы, как *Music 4*, *C-Sound*, *Supercollider*, *MAX/MSP* и т.п. В алгоритмической музыке в качестве отправной точки часто используется колебание некоторой величины в определенном диапазоне по случайному закону. Компьютерная композиция в качестве «темы» опирается на конструктивный алгоритм, который всегда индивидуализирован в композиторском сознании, а специально созданная программа в определенной ситуации может быть приравнена к прототипу произведения.

Алгоритмическая композиция позволяет композиторам максимально точно передать свою идею в будущем произведении, разработать неповторимый никем и зачастую единственный в творчестве самого автора тип композиции, структуру, элементы музыкального языка. Она включает в себя действия, применяемые к различным параметрам композиционного процесса – от выработки определенных закономерностей произведения на этапе его подготовки, генерации последовательности звуковысот, длительностей, ритмических групп – до созданных с помощью компьютерных программ полностью автоматизированных алгоритмических произведений (в последнем случае акт творчества имеет место только при составлении такой программы самим композитором).

Существуют детерминированный и стохастический способы создания алгоритмической композиции. Стохастический частично связан с понятием «хаотичность», а своеобразным ответвлением его является применение теории хаоса, использующей различные нелинейные динамические уравнения, выведенные на основе природных процессов и таких хаотических структур, как, например, фракталы.

Возможны четыре типа алгоритмической композиции:

- композиция, основанная на применении математических функций: стохастических, теории хаоса, фракталах;
- композиция, основанная на применении комбинаторных методов (например, марковских цепей, ассоциативных сетей переходов, стохастических матриц);
- композиция, основанная на применении природных процессов: клеточных автоматов, генетических алгоритмов, нейронных сетей;
- композиция, построенная с помощью процессов, основанных на правилах.

Если рассматривать музыку как передачу информации от композитора и музыканта к слушателю, то можно анализировать информационное содержание музыкального произведения с помощью энтропии Шеннона (см. курс лекций И.Н. Бекмана "Информатика").

Многие алгоритмы, используемые в музыке, стоят на идеях фрактальной геометрии.

Ради простоты, в этом разделе под фракталом будем понимать структуру, состоящую из частей, которые в каком-то смысле подобны целому. Напомним, что в основе формирования фрактала лежит процедура, в которой последующие значения (состояния) получают из предыдущих. Фракталы сочетают в себе детерминированные (подчиняются определенному алгоритму формирования) и стохастические (в процессе развития не принимают повторяющихся состояний) свойства. К тому же фракталам присуща симметрия, а их форма воспроизводится в различных масштабах.

После того, как фрактальная геометрия достигла определённой степени развития под солнцем, искусствоведы обнаружили, что некоторые композиторы, сами того не подозревая, использовали идеи фракталов в своём творчестве. В последнее время вместо традиционных композиторов появились увлечённые музыкой математики, которые разрабатывают программы генерации произведений на основе фрактальных объектов, и увлечённые математикой композиторы, которые применяют компьютерные программы в своём творчестве.

Как ни странно, но существенный вклад в развитие фрактальной музыки внёс венгерский биолог и ботаник Аристид Линдермайер, который в 1968 г. предложил математическую модель для изучения простых многоклеточных организмов, которая нашла применение в моделировании сложных ветвящихся структур: деревья, цветы и др. Линденмайер обнаружил, что поведение клеток растений подчиняется математическим законам самоподобия, и на основе своего открытия разработал математический аппарат – *L*-системы. В их основе лежит фрактальный принцип: каждая часть предмета похожа на весь предмет целиком. Изначально *L*-системы применяли при изучении формальных языков и в селекции. С помощью *L*-систем можно строить многие известные самоподобные фракталы: снежинку Коха, «ковёр Серпинского», разнообразные новые

фракталы. *L*-системы широко используют в компьютерной графике и гейм-девелопменте. Большая часть современной фрактальной музыки написана с использованием именно *L*-систем.

В музыке приложение элементов фрактальной геометрии используют в трёх областях: композиция, синтез звука, аналитические исследования. Популярным является использование систем нелинейных динамических уравнений в алгоритмической композиции - метод фрактальной композиции. Считается, что в музыкальном плане наиболее интересными являются алгебраические и стохастические фракталы, в которых лучше проявляются такие свойства фрактальных множеств, как нерегулярность и самоподобность. Стохастическими фракталами (фракталами, при построении которых в итеративной системе случайным образом изменяются какие-либо параметры) позволяют осуществить естественный переход в музыкальном произведении от некоторого порядка к детерминированному хаосу.

Исследователи фракталов и крупномасштабной временной структуры акустической речи и музыки выявили, что любая музыка (точнее её ритмическая сторона) имеет фрактальную природу. Это открытие стимулировало направленное создание фрактальных форм в новой музыке.

Итак, любой звук имеет фрактальные свойства. Обычно выделяют три категории звука, основанные на математических элементах:

- белый шум (случайный шум – определяется как тревожащий слушателя);
- розовый шум (занимает промежуточное положение, более структурированный, нежели белый – является самым приятным для восприятия слушателя);
- коричневый шум (структурированный шум – определяется как механический для слушателя).

Используя фрактальную природу розового шума, можно генерировать приятные для слуха мелодии, так как розовый шум является балансом между полной хаотичностью и чрезвычайной структурированностью. Например, существует связь треугольника Серпинского с формой рондо, а на основе треугольника снежинки Коха удаётся генерировать полифонические произведения. Путём анализа спектральной плотности, розовый шум обнаружен в Бранденбургском концерте Баха и регтаймах Джоплина.

Основным способом получения звуковых материалов с помощью фрактальной методики является генерация изображений с их дальнейшим переводом в звуковую область по некоторым правилам, например, с помощью привязки фигуры к условной сетке координат, одним из измерений которой будет высота звука, а другим – длительность нот. Такая процедура носит название сонификации. Существуют программы), способные переводить фрактальные изображения непосредственно в звуковой спектр.

Фрактальная композиция развивается, создавая новый музыкальный материал, систематически преобразовывая предыдущий. Траектория хаотической орбиты определяет некоторый диапазон значений, который позволяет системе блуждать и возвращаться к подобному, но не тому же значению. Когда подобные процессы интерпретируются музыкально, это может

сравниться с развитием музыкальной темы. Эта похожесть – то, что делает хаотические орбиты привлекательными для генерации музыкального материала. Производный, таким образом, материал имеет высокую степень схожести с предыдущим. Однако полученный материал является музыкой лишь в потенциале и требует серьезной работы с ним композитора.

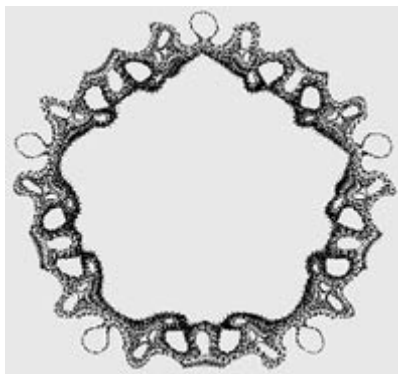


Рис. 1. Фрактал Иванова.

Внедрение энтропийных процессов в электронную музыку сделало её более разнообразной, гармоничной, более близкой к природе, ибо природа есть совокупность строгих правил и случайных процессов. Влияние случайности очень велико при создании каких-либо композиций, поэтому генеративный фрактальный подход к синтезу звука и построению музыкальных произведений позволил композиторам создавать произведения, которые при каждом проигрывании изменялись, трансформировались. Теперь один и тот же трек можно слушать часами.

Фрактальные композиции можно создать несколькими способами: 1) графическое изображение фрактала конвертируется в двумерную партитуру (координаты графика высота и время), причём учитывается графическое расположение точек и их цвет, что соответствует тембровым изменениям; 2) арифметическими расчётами по фрактальным формулам определяются высоты и длительности звуков; 3) трансформация музыкального параметра с целью предания ему фрактального характера - ассоциативный уровень использования фрактальности; 4) фрактальная композиция через игровое поведение (перформанс), через структуры, в которых исполнители взаимодействуют на основе некоторых правил, создавая на протяжении пьесы модель поведения на основе определенных правил, соответствующих моделям сложных фрактальных систем.

Способ 1 даёт не очень интересный результат (в музыке не столь очевидна гармония пропорций, которая так хорошо схватывается зрительно). Существуют компьютерные программы перевода фракталов в звук, одна из известных – «Хорошо темперированный фрактал» Р.Гринхауза в основе которой – фрактал Иванова (рис.1). В ней конвертация 10 различных типов фракталов даёт ряд из 21-го варианта звукоряда; звуковой результат варьируется по динамике, артикуляции, октавному расположению. Результат используется как сырой материал для будущей композиции.

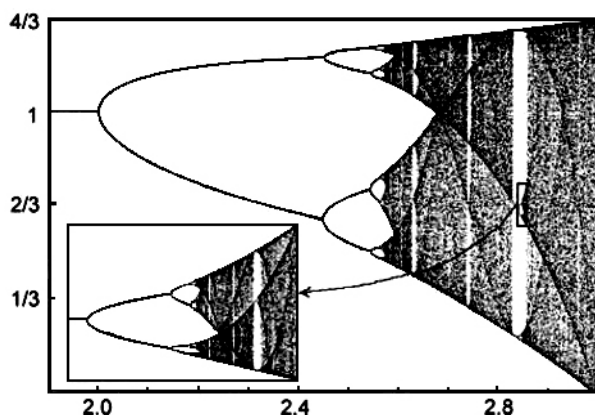
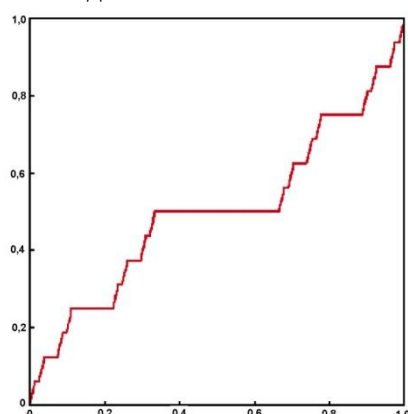


Рис. 2. Сценарий проникновения в хаос: переход от бифуркаций к хаосу.

Примером способа 2 (расчёт по формуле) является композиция Гарри Ли Нельсона (композитор специализируется в алгоритмической композиции с помощью компьютера, интерактивной композиции в реальном времени и в создании видеоинсталлий) «Путешествие галеры Йота» – пьеса посвящена предполагаемому некоторыми историками путешествие финикийцев на галере Йота (малая величина) от Средиземноморья до

Южной Америки. В основе композиции лежит «сценарий перехода к хаосу» математика Ферхюльста (рис. 2), предложившего теорию роста популяции насекомых. Если коэффициент прироста $P < 2,5$ – то имеет место быстрая стабилизация вокруг одного аттрактора; при увеличении P возникают бифуркации вокруг двух, четырех, восьми аттракторов и т.д., пока, при увеличении коэффициента $P > 4$, не наступает хаос, в котором тем не менее наблюдается самоподобие стремления к мельчайшим аттракторам. В композиции формула Ферхюльста использована на двух уровнях: 1) макро-: как огибающая всего сочинения: распределение количества событий (значение P возрастает до 4 в точке золотого сечения пьесы и затем убывает до нуля); 2) микро-: для производства событий в микротоновом звукоряде: значения функции распределены в диапазоне семи октав (192 тона в октаве). Здесь не только микротоновая, но и микроритмическая техника: техника звуковых микрочастиц, – «гранул», продолжительностью менее 50 мсек.

В гранулярном синтезе большое количество микрорезов собрано в массивы (это напоминает живопись художников- пуантилистов, создающих изображение из маленьких цветных точек). Сложение «гранул» происходит на столь мельчайшем уровне, что это никак нельзя отнести к области ритма. Создаваемая при помощи электронной аппаратуры (применяется "гиперинструмент", который предполагает наличие целой системы, состоящей из компьютера, набора цифровых синтезаторов, исполнительского интерфейса и программного обеспечения для их связи) высокая плотность «гранул» (до нескольких тысяч в секунду) порождает необычный эффект в виде многосоставного звукового комплекса с богатым, динамически изменяющимся во времени спектром, не связанным напрямую со звучанием какой-либо одной «гранулы». Благодаря распределению зерен с их частотами, амплитудами, тембрами возникают большие звуковые структуры. В "хаосе" используется простая повторяющаяся и рекурсивная функции, чтобы создать музыкальные образцы, в которых изменяется материал от отдельных повторяющихся событий до последовательностей большой сложности с изменением отдельных параметров. Эти



характеристики становятся своеобразным метафорическим остоном сочинения.

Рекурсивная функция - функция, которая в своем определении содержит обращение к самой себе.

Рис. 3. Чёртова лестница (канторова лестница – пример непрерывной монотонной функции $[0,1] \rightarrow [0,1]$, которая не является константой, но при этом имеет производную, равную нулю в почти всех точках). Она имеет «неравные ступени», почти везде вертикальную крутизну, и уходит в бесконечность.

В сочинении («Горный фрактал») Нельсон применил рекурсивное12 разделение времени, высоты и амплитуды на основе фрактального алгоритма. Он интегрировал фрактальную технику в интерактивный перформанс и композицию. Для создания формальной структуры в сочинении Летняя песня» композитором была использована символическая грамматика замены, имеющая графическое описание в виде кривой Гилберта.

По способу 3 написана композиция "Profile" (Ч. Додж) представляет собой синтез речевых и вокальных звуков. Трехголосный полифонический склад, в котором каждая мелодическая линия получена стохастическим методом (генератор фрактального шума). Генерация нот прекращается

после появления определенного количества звуковых классов. Голоса не идентичны, но самоподобны - как различные уровни измерений во фрактале, например, в кривой Коха). Звуковой результат - ощущение общей взаимосвязанности и статики.

Другим примером из инструментальной музыки считается фортепианный этюд Д.Лигети «Чёртова лестница». Название этюда имеет прямое отношение к математике: «чертова лестница» – феномен, связанный с канторовским множеством (рис. 4). Однако Лигети никогда не использовал в своей музыке фрактальные формулы напрямую, предпочитая их общеассоциативное воздействие. Он выстраивает свою «музыкальную лестницу» – восхождение, воплотив отношения «двойственности» и «тройственности» через по-особому организованное чередование ритмических ячеек – $2/8$ и $3/8$. Бесконечность подъемов означает невозможность достижения вершины.

Примером способа 4 является своеобразная «партитура» и свод правил для исполнителей в произведении Д.К.Литтла «*Brain Wave*» (волна мозга, иногда переводят как озарение). Здесь принцип фрактальности реализован как игровой метод в перформансе). Композитор стремится создать «интерактивную ситуацию не только как модель природных процессов», но и как аналогию с работой человеческого мозга. Все музыканты импровизируют не только согласно заданным правилам, но и в зависимости от действий впереди и сзади сидящих других музыкантов (т.е. некое коллективное бессознательное, саморегулирующая музыкальная ситуация). Исполнитель, сидящий впереди музыканта, оказывает положительное влияние на его действия, сидящий сзади – отрицательное. Композитор приводит таблицу возможных реакций перформера (игрока) на эти влияния. Так, если играет впереди сидящий исполнитель, перформер может начать играть, играть громче, играть больше повторных проведений, пытаться подражать стилю другого исполнителя, пробовать соответствовать темпу игры впереди сидящего. Если же играет позади сидящий блок-флейтист, перформер может: остановить игру, прервать более мягкое исполнение или «двигаться» сразу к следующему звуковому событию, пытаться играть в стиле, противоположном стилю сидящего сзади игрока»; играть в противоположном ему темпе и т.д. При этом все исполнители периодически оказываются в разных ролях и перемещаются по залу. Цель состоит не в том, чтобы синхронизировать точно действия перформера с другими исполнителями, но коррелировать действия его и остальных. Так как никакого проводника не существует, каждый музыкант, внимательно следя за звучанием ансамбля, должен частично взять инициативу ведения звука на себя, предполагая возможное звучание.

Метод фрактальной композиции сложился в рамках творчества композиторов Ч. Додж, Г. Ли Нельсон, М. МакНабб, Б. Эванс, Л. Остин, Ч. Вуоринен, Д. Лигети, Д.Кл. Литтл, Том Джонсон. Для генерации и организации музыкального материала на основе фрактальной модели созданы компьютерные программы, Р. Гринхауза, Т. Джонсона, Г. Ли Нельсона, Д.Кл. Литтла, Ч. Доджа и др. Программы *FractMus 2000* (Г. Диас-Херес), *MusiNum 2.0* (Л. Киндерман, *Fractal Musician Program* (Ф. Томпсон), *Quasi Fractal Music* (П. Вэлли), *Omar's Fractal* (Ч. Невилл), *Mandelbrot32* (Йо Кобута), *Orchaos* (Р. Ватсон), *LMUSe* (Д. Шарп), *Oblivion*(«Cynique»), *Symbolic Composer* (Э. Тобенфельд) и другие.

Для генерации «фрактального музыкального материала» создаются специальные компьютерные программы. Одна из первых таких программ – *Xcomposer* использует главное качество фракталов – метод самоподобия. При этом необходимо, чтобы сегмент, предшествующий главному событию, а также следующий за ним, содержал равномерный ритм. Носителем главного события может оказаться любой элемент на любом иерархическом уровне. Среди последних программ, разработанных для генерации музыкального материала на основе фрактальной модели можно выделить программы *FractMus 2000*, *MusiNum 2.0*, *Fractal Music Program*, *Quasi Fractal Music*, *Oblivion* и другие. Все эти программы позволяют «увидеть» сочиненную музыку, так как генерируют графическое изображение параллельно созданию музыки. Главная особенность *MusiNum 2.0* заключается в том, что пользователь не должен обладать знаниями в области информатики и теории музыки.

Программа - *MusiNum*, разработанная Ларсем Киндерманном, генерирует последовательность целых чисел, на их основе формирует фракталы, которые и преобразует в музыку. Специальный модуль позволяет выбрать 16 параметров голосов. Одновременно для всех голосов может быть установлен темп композиции. С помощью диалогового окна задаётся сценарий, который позволяет изменять параметры синтеза музыки в процессе исполнения композиции, что делает её более динамичной. В результате получается бесконечная непериодическая последовательность. Она обладает двумя свойствами самоподобия: 1) последовательность самопорождающаяся и может быть получена из нуля; 2) выборка каждого второго элемента из последовательности даёт ту же последовательность. Сформированная таким образом последовательность обладает свойствами фрактала. Это означает, что каждый отдельно взятый фрагмент музыки будет с одной стороны неповторимым, а другой - чем-то похожим на остальные фрагменты.

Фрактальная геометрия – пример получения сложности с помощью простых манипуляций простым материалом. Она позволяет естественным образом включить в музыку природные формы

(звуки дождя, текущей воды, пение цикад и др.) и их аналоги, созданные воображением композитора. В простейшем варианте играет мелодия на каком-то инструменте, каждая нота этого инструмента - тоже эта мелодия, бас - это тоже быстрое проигрывание этой мелодии, уровень партии меняется не хаотично, а по ритму той же мелодии. Но хаотичность, точнее неровность, всё же присутствует.

Современные музыковеды пытаются осознать музыку как абстрактное искусство, а также выявить некие универсальные законы создания музыкального произведения. Фрактальная музыка объединяет искусство и науку. Готовое произведение состоит из формулы, изображения и искусства, оно представляет собой единение музыкальной, музыкально-логической и абстрактной мысли. Применение в композиции теории нелинейной динамики, хаоса, фрактальности позволяет восполнить пробелы в знании связи точных наук и музыки. Сейчас фрактальная музыка реально существует, развивается, а не является областью игры интеллекта.

2.2 Фракталы в дизайне, скульптуре и архитектуре

Фрактальное искусство - составной компонент компьютерного искусства.

Компьютерное искусство (цифровое искусство, дигитальное искусство) — творческая деятельность, основанная на использовании информационных (компьютерных) технологий, результатом которой являются художественные произведения в цифровой форме.

Своими необычными и яркими формами фракталы быстро нашли воплощение в дизайне мебели, паркета, столешниц, подносов, витражей, ваз и даже носков (рис. 4). Фракталами увлеклись и скульпторы (рис. 5), архитекторы (рис. 6) и садово-парковым дизайне (рис. 7).

2.3 Фракталы в живописи

Цель, стоящая перед искусством, состоит в живописной выразительности и точности изображения окружающего нас мира. Компьютеры обеспечили возможность создания трёхмерных изображений фантастических пейзажей и других картин с фотографической точностью. А вместе с картинами появилась возможность не ловить отдельные мгновения, а охватывать действительность в движении и измерениях. Время на этих картинах не зафиксировано и можно построить плоские или трёхмерные движущиеся изображения даже с тех точек зрения, которые недоступны человеческому глазу или камере.

Компьютерная графика - графические изображения, созданные компьютером.

Фрактальная графика, также как векторная и трёхмерная, является вычисляемой. Её главное отличие в том, что изображение строится по уравнению или системе уравнений. Изменяя и комбинирую окраску фрактальных фигур, можно моделировать образы живой и неживой природы, а также, составлять из полученных фигур различные композиции.

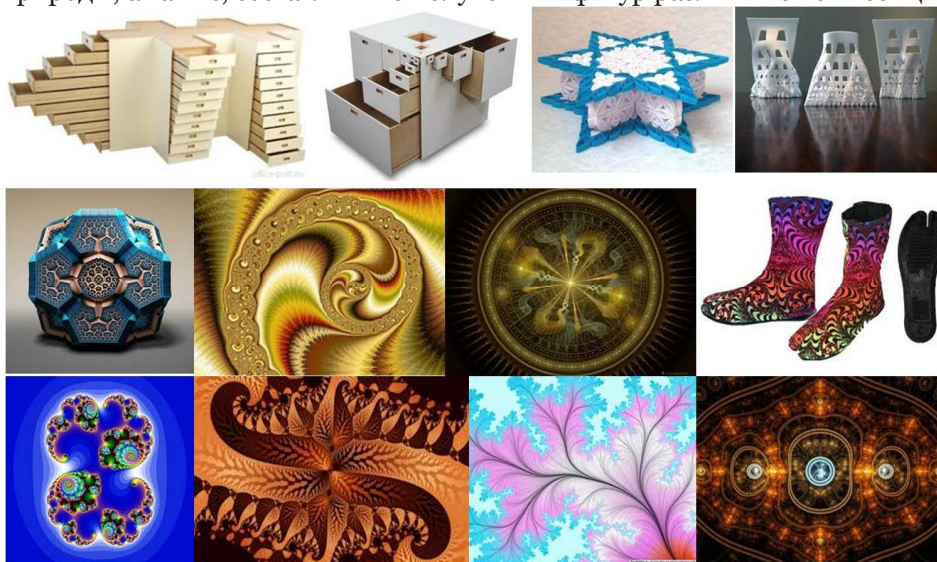


Рис. 4. Фракталы в дизайне.



Рис. 5. Фракталы в скульптуре.



Рис. 6. Фракталы в архитектуре



Рис. 7. Фрактал в садово-парковом дизайне.

Фрактальные картины отражают хаос и порядок, их конкуренцию и сосуществование. Они показывают переход от одного к другому и то, какой сложной является область перехода. Зависимость структуры границ от определённых параметров приводит к границам другого уровня и открывает закономерности, о существовании которых ещё недавно никто не подозревал. На картине происходит конкуренция нескольких центров за доминирование на плоскости, при этом происходит нескончаемое филигранное

переплетение и непрерывающаяся борьба даже за самые малые участки. Именно в этой пограничной области происходит переход от одной формы существования к другой: от порядка к беспорядку. Пограничные области замысловато зависят от условий, характеризующих изучаемый процесс. Порой возникает третий конкурент, который пользуется разногласиями двух других и насаждает свою область влияния. Может случиться, что один центр захватит всю плоскость, но и его власть имеет границы в виде изолированных точек, которые неподвластны его притяжению.

Рисунки представляют собой процессы, являющиеся весьма упрощённой идеализацией действительности. Они преувеличивают некоторые свойства, чтобы сделать их более ясными. Например, нет ни одной реальной структуры, которую можно было бы последовательно увеличивать бесконечное число раз, и которая выглядела бы при этом неизменной. Тем не менее, принцип самоподобия в приближённом виде имеются в природе (линии морей и рек, облака и деревья, турбулентный поток жидкости, иерархическая организация живых существ и т.п.).

Как только компьютерная графика получила широкое распространение, немедленно выяснилось, что художники уже использовали идеи фрактальной геометрии, причём неоднократно. Примером является гравюра на дереве японского художника Кацухи Зокусая «Большая волна в Канагаве» (1932 г.), на которой изображена огромная волна, нависшая над лодкой близ префектуры Канагава (рис.8). Гора Фудзи виднеется вдалеке и является фоном к

основному действию на картине. Вода изображена в движении. Пена волн здесь похожа на когти, которые готовы вцепиться в лодку. Лодка и волна как бы переплетены друг с другом – в то же время, между ними огромное пространство. Это придает напряжение сюжету: мы видим людей на крошечной лодке, скользящих по горам воды только для того, чтобы выжить. Считается, что Хокусай интуитивно стремился изобразить явления этого мира с помощью неких закономерных и самоподобных структур. В его творчестве явно видно, как художник использует образы фракталов — это и пятна деревьев, и завитки морских волн, и горы, и тени туч на земле, и многое другое. Он чётко осознавал, что природа полна самоподобными объектами, и старался это изобразить.



Рис. 8. Картина Кацухи Зокусая «Большая волна в Канагаве».

В работах художника Маурица Эшера (1898-1972) явно присутствуют признаки, характерные для фракталов: самоподобие и рекурсия («Рисующие руки» в этом отношении можно назвать простейшей рекурсивной картиной). А в работе «Предел круга III» затрагивается тема бесконечности (самоподобные рыбоподобные фигуры уменьшаются при удалении от центра круга, плотно заполняя при этом поверхность; подобное уменьшение может быть бесконечным). Здесь представлен один из двух видов неевклидова пространства, описанных французским математиком Пуанкаре.



Рис. 9. Картины М. Эшера: Рисующие руки; . Ограничение площадью; Предел круга III.

Осознанно элементы фракталов стали проявляться в работах художников, работающих в стиле оп-арт (оптические иллюзии), в котором используются различные оптические иллюзии, основанные на особенностях восприятия плоских и пространственных фигур. Одним из ярких представителей оп-арта является Виктор Вазарели. Две его работы приведены на рис. 10.

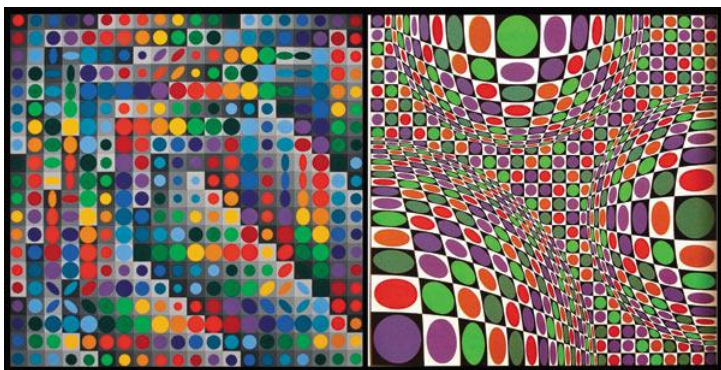


Рис. 10. Примеры работ В. Вазарели в стиле оп-арт.

Сейчас фрактальная живопись представлена десятками тысяч людей по всему миру, рисующих фракталы. Уже накоплено огромное количество фрактальных работ, некоторые из них вполне можно признать шедеврами геометрического абстракционизма.

Многие художники стали признанными мастерами в этой области, их работы печатаются в серьезных изданиях, многие работают в крупных и солидных дизайнерских фирмах. Представителями этого направления искусства являются Линда Эллисон, Дэмиен М. Джонс, Керри Митчелл, Сильви Галле, Дэвид Эприл, Рауль Декель, Надя Крингельс, Хизер Ламб, Дэмиен Гиродон, Чара Б. Сильвия Кордедда и многие другие.

Например, итальянская художница Сильвия Кордедда создаёт картины, которые являются результатом расчётов фрактальных объектов, повторяющих очертания цветов, с последующим

визуальным отображением. Используя компьютерные программы она «выращивает» растения, которые не встретишь в реальном мире, но которые по-своему прекрасны (рис. 11).

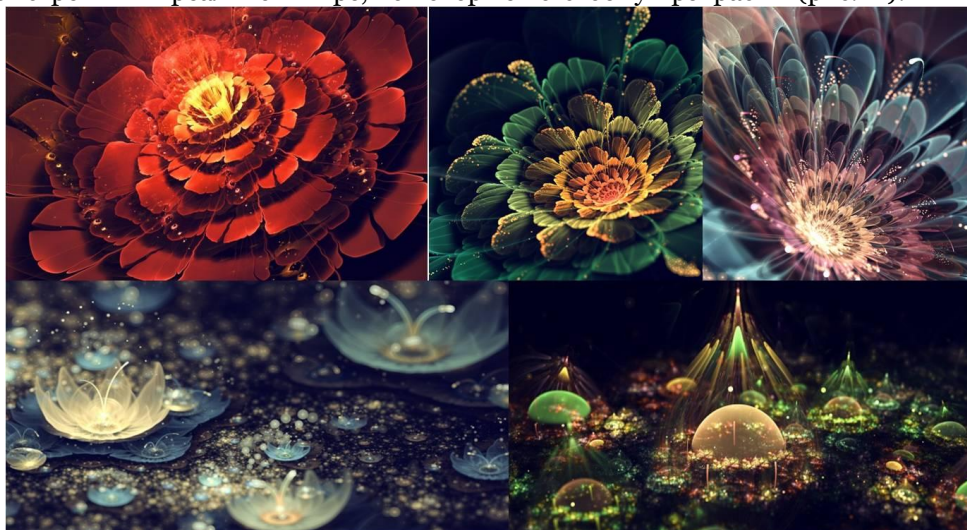


Рис. 11. Картины Сильвии Кордедда.

Из отечественных авторов можно назвать Алексея Ермушева, Дмитрия Шахова и Андрея Лёушкина (Примеры их работ представлены на рис. 12).

Постепенно понятие «фрактальное искусство» вышло далеко за рамки математического, алгоритмического, цифрового искусства. Концепции фрактальности обязаны своим возникновением такие новые формы живописи и медийного искусства как фрактальный экспрессионизм (аналоговая фрактальная живопись), фрактальные монотипии, фрактальная абстракция, фрактальный реализм Вячеслава Усеинова (рис. 14а), фрактальный супрематизм (рис. 14б).



Рис. 13. Картины российских художников: а) Алексей Ермушев «Life Generator», б) Дмитрий Шахов «the wind of Andromeda», в) Андрей Лёушкин «the Eagles colors», г) SBDstroitel «Caleidoscope», д) AquaLena «Dragons line», е) Italija — «fractal angel»



Рис. 14. В.Усеинов, Тень несуществующего дома и Виктор Рибас, Composition N1.

**Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Химический факультет**

Междисциплинарный университет Бекмана

**Профессор, д.х.н.
Бекман Игорь Николаевич**

СИНЕРГЕТИКА

Курс лекций

Москва, 2010

Аннотация

Учебное пособие "Синергетика" - конспект лекций профессора химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова Бекмана Игоря Николаевича, читаемого слушателям Междисциплинарного университета. В курсе лекций изложен критический анализ опыта использования редуктивизма, системного анализа, синергетики и холизма в научном познании мира. Рассмотрены эффекты синергизма, повлиявшие на создание науки - синергетики. Проведено сравнение синергетики и кибернетики как междисциплинарных наук. Даны определения таких параметров, как порядок, беспорядок, хаос, детерминированный хаос, методы управления ими и процессы самоорганизации. Основное внимание уделено математическим основам синергетики, включая методы математической физики (линейные и нелинейные дифференциальные уравнения в частных производных), равновесную и неравновесную термодинамику, статистическую физику, динамику нестационарных процессов, геометрию фракталов и теорию катастроф. Значительная часть пособия посвящена практическому применению идей и методов синергетики в физике, химии, биологии, экологии, истории, социологии, политике, государственном управлении, экономике, образовании, культуре и искусстве. В заключительной части пособия исследуются перспективы использования синергетики для предсказания направлений будущего развития, в частности, возможность восстановления союза человека с природой на новых основаниях, в котором будет не только единство природы и человека, но также науки, культуры и общества.

Учебное пособие предназначено для широкого круга читателей, интересующихся новыми науками.

Содержание

Предисловие

1. Синергизм и синергетика
 2. Динамические системы
 3. Самоорганизующиеся системы
 4. Необратимая термодинамика
 5. Теория катастроф и революций
 6. Геометрия фракталов в синергетике
 7. Синергетика в физике
 8. Синергетика в химии
 9. Синергетика в биологии, экологии и медицине
 10. Синергетика и информатика
 11. Синергетика в теоретической истории
 12. Синергетика и культура
 13. Синергетика образования
 14. Синергетика в социологии, управлении и политике
 15. Синергетика в прогнозах будущего развития
- Заключение

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
Лекция 1. СИНЕРГИЗМ И СИНЕРГЕТИКА.....	6
1.1 Редуктивизм, системный анализ, холизм и синергетика.....	6
1.2 Неравновесная термодинамика	8
1.3 Синергетика и самоорганизующиеся системы.....	13
Лекция 2. ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ.....	18
2.1 Порядок и хаос	18
2.2 Виды сложных систем.....	21
2.3 Открытие детерминированного хаоса.....	24
2.4 Элементы теории динамических систем.....	26
2.5 Примеры динамических систем с детерминированным хаосом	35

ПРЕДИСЛОВИЕ

*Синергетику можно рассматривать
как новое междисциплинарное движение
в современной науке, знаменующее собой
становление нового взгляда человека на мир
и на самого себя в этом мире.*

*Синергетика - это новый диалог человека с природой,
новый синтез человеческого знания и мудрости.*

*Синергетика - новый подход к познанию кризисов,
нестабильности и хаоса, к созданию средств
управления ими.*

*Е.Н. Князева, С.П. Курдюмов
Основания синергетики.*

*Режимы с обострением,
самоорганизация, темпомыры.*

В настоящее время в образовании царствует разделение науки на отдельные компоненты.



Это проявляется в существовании специализированных ВУЗов, факультетов, кафедр и лабораторий. Курсы лекций: "неорганическая химия", "сопротивление материалов", "педиатрия", "история искусств" слушают разные студенты. Чем весьма довольны.

Между тем границы между традиционными дисциплинами начинают стираться. Уже возникли центры по исследованию "сложной динамики", "нелинейных явлений" и других аспектов, которые не уточняют, какие явления - физики, химии, биологии, экономики или искусства - они рассматривают. На семинарах в этих центрах изучаются как метаморфозы растений и животных, так и проблемы физики плазмы, психологии

восприятия или социального поведения, математическая теория катастроф, революций и фазовых переходов, миграция народов и веществ и т.п.. Идеология изучаемых предметов строится на том факте, что процессы образования структур и самоорганизация развиваются в соответствии с небольшим числом сценариев, не зависящим от конкретной системы. Например, образование внутренних структур в лазере происходит в соответствии с законами, аналогичными конкуренции молекулярных видов на ранней эволюции жизни.

Важным направлением, в котором естественным образом сочетаются существующие в настоящее время науки, является синергетика, которая целенаправленно ищет правила, по которым возникает порядок в сложных системах. Предметами этой науки хаос и порядок, их конкуренция и существование, нелинейность и нестабильность, неустойчивые динамические системы и устойчивое развитие, самоорганизация сложных систем разного рода, трансформации в системах, эволюция границ раздела между системами во времени и пространстве.

Развитие наук всегда требовало усилий по подготовке специалистов, призванных внедрять в практику эти самые науки и развивать их более интенсивно. Новый университет дистанционного образования - Интерактивный междисциплинарный университет профессора Бекмана, БУМ, - готовит специалистов (энциклопедистов) владеющих техникой междисциплинарного мышления, способных преподавать междисциплинарные предметы и использовать полученные знания в управленческой деятельности.

Естественно, что синергетика, пытающаяся объединить различные науки в единую систему, является одной из основных дисциплин, преподаваемых в БУМ.

Предлагаемое здесь учебное пособие представляет собой конспект лекций по курсу "Синергетика", читаемых для слушателей БУМ в течение всего процесса обучения. Курс дополнен семинарами и практическими занятиями.

Предлагаемое учебное пособие состоит из двух частей. В первой (теоретической) части приведён критический анализ опыта использования редуktivизма, системного анализа, синергетики и холизма в научном познании мира. Рассмотрены эффекты синергизма, повлиявшие на создание науки - синергетики. Даны определения таких параметров, как порядок, беспорядок, хаос, детерминированный хаос, методы управления ими и процессы самоорганизации. Основное внимание уделено математическим основам синергетики, включая методы математической физики, неравновесную термодинамику, статистическую физику, динамику нестационарных процессов, геометрию фракталов и теорию катастроф. Вторая часть курса посвящена практическому применению идей и методов синергетики в физике, химии, биологии, экологии, истории, социологии, политике, управлении, экономике, образовании, культуре и искусстве. В

заключительной части пособия исследуются перспективы использования синергетики для предсказания направлений будущего развития, в частности, возможность восстановления союза человека с природой, в котором будет не только единство природы и человека, но также науки, культуры и общества.

Лекция 1. СИНЕРГИЗМ И СИНЕРГЕТИКА

*Целое это больше, чем сумма его частей
Аристотель «Метафизика»*

Древние натурфилософы рассматривали мир, как единое целое. Это было правильно, но сильно мешало развитию наук, т.к. найти описание сложных природных явлений и дать прогноз из развития оказалось непосильной задачей. Со временем осознали, что если нельзя объять необъятное, то можно расчленить его на части и даже частицы, после чего изучить каждую часть в отдельности, т.е. провести анализ. Анализ (аналитическая методология) стимулировал развитие наук, так что возникли многочисленные частные науки: физика, химия, биология и т.п., которые тут же начали делиться на более частные: неорганическая, органическая, физическая химия и т.п. Это деление продолжается и сейчас.

1.1 Редуктивизм, системный анализ, холизм и синергетика

Применение анализа при исследовании достаточно сложного объекта называется редукцией, под которой понимают упрощение, сведение сложного к более простому, обозримому, доступному для анализа и управления. С помощью анализа были решены конкретные проблемы, например, создана модель атома. Появился соблазн объяснения сложных явлений, исходя из законов, полученных при изучении простых систем. Например, предпринимались попытки свести биологические явления к химическим и физическим законам, или социологически – к биологическим.

Однако со временем учёные обнаружили, что и природа и общество сложны, а механистическая картина мира, которой они так долго и с таким успехом придерживались, отражает лишь жёсткие причинно-следственные связи и линейный характер зависимостей. Между тем, в нас и вокруг нас царит детерминированный, динамический по своей природе, хаос, управляемый к тому же нелинейными законами. Мало изучить влияние внешних сил на сложные системы, отработать способы управления ими, но и следует сформулировать законы организации внутренней структуры этих систем, законы их самоорганизации, саморазвития и самоуправления.

Требования века заставили перейти от анализа и редуктивизма к холизму, т.е. к философии цельности. Конечно, следует развивать междисциплинарные направления в науке, междисциплинарное образование и междисциплинарное мышление. Но этого мало! Объединение разных наук приводит к эффектам синергизма, т.е. к ситуациям, когда целое больше, чем простая сумма его частей. Следовательно, развитие наук следует вести в рамках синергетики, с учётом идей фрактальной геометрии (самоподобия), автоволновых процессов, случайностей и детерминированного хаоса.

Начнём с некоторых определений.

Редукционизм (*reductio* – возвращение, приведение обратно) – методологический принцип, согласно которому сложные явления могут быть полностью объяснены с помощью законов, свойственных явлениям более простым (например, социологические явления объясняются биологическими или экономическими законами). Редукционизм абсолютизирует принцип редукции (сведения сложного к простому и высшего к низшему), игнорируя появление эмерджентных свойств в системах более высоких уровней организации. Хотя как таковая, обоснованная редукция может быть плодотворной (пример – планетарная модель атома).

Эмерджентность (*emergent* – возникающий, неожиданно появляющийся) в теории систем – наличие у какой-либо системы особых свойств, не присущих её подсистемам и блокам, а также сумме элементов, не связанных особыми системообразующими связями; несводимость свойств системы к сумме свойств её компонентов; синоним – «системный эффект». В биологии и экологии понятие эмерджентности можно выразить так: одно дерево – не лес, скопление отдельных клеток – не организм. Например, свойства биологического вида или биологической популяции не представляют собой свойства отдельных особей, понятия рождаемость, смертность неприменимы к отдельной особи, но применимы к популяции или виду в целом. В эволюционистике выражается как возникновение новых функциональных единиц системы, которые не сводятся к простым перестановкам уже имевшихся элементов. В почвоведении: эмерджентным свойством почвы является плодородие.

Анализ – процедура мысленного расчленения предмета на части в целях его дальнейшего изучения.

Системный анализ – метод познания, представляющий собой последовательность действий по установлению структурных связей между переменными или элементами исследуемой системы. Это методология решения сложной проблемы путём последовательной декомпозиции её на взаимосвязанные частные подпроблемы. Любой объект бесконечно сложен, поэтому задача упрощается выделением только тех элементов и связей, которые обеспечивают достижение цели. Системное исследование представляет собой процедуру

описания объекта, способа его функционирования и тенденций развития. Основная процедура – построение обобщенной модели, отображающей взаимосвязи реальной ситуации. Системный анализ применяется для решения задач, для которых отсутствуют стандартные решения, и которые, в принципе, не могут быть формализованы без использования методов системного анализа. Идеи системного анализа используются для управления. Полезность системного анализа обусловлена глубоким проникновением в суть проблемы, выявлением взаимосвязей, способствующих обнаружению нестандартных решений, в большей четкости формулирования целей, в большей эффективности распределения ресурсов. Ограниченность системного анализа обусловлена неизбежной неполнотой анализа (принцип непознаваемости), приближённой оценкой эффективности, отсутствием способов точного прогнозирования перспективы.

Холизм (Holos - целое, всё, всего) – учение о целостности нашего мира, о том, что все его элементы, живая и неживая природа – связаны как части единой большой системы – Бога, Мира, Вселенной. Исходная трактовка холизма более функциональна и близка к синергетике – все свойства некоей системы, будь то (физическая, биологическая, химическая, социальная, экономическая, психическая, языковая или любая другая система.) не могут быть определены или объяснены по свойствам отдельных составных частей. Вместо этого, наоборот, система как целое, определяет способ поведения своих частей.

Синергизм – совместное действие для достижения общей цели, основанное на принципе, что целое представляет нечто большее, чем сумма его частей. Синергизм означает превышение совокупным результатом суммы слагающих его факторов. Так, доходы от совместного использования ресурсов превышают сумму доходов от использования тех же ресурсов по отдельности. Данное понятие также называется синергетическим эффектом (эффектом $2+2=5$).

Синергетика (приставка со значением совместности и «деятельность»), или **теория сложных систем** – междисциплинарное направление науки, изучающее общие закономерности явлений и процессов в сложных неравновесных системах (физических, химических, биологических, экологических, социальных и других) на основе присущих им принципов самоорганизации. Синергетика является междисциплинарным подходом, поскольку принципы, управляющие процессами самоорганизации, представляются одними и теми же безотносительно природы систем, и для их описания должен быть пригоден общий математический аппарат.

Редукция предполагает, что сложные явления могут быть объяснены на основе законов, свойственных более простым системам. Сводя сложное к более простому, анализ игнорирует специфику более высоких уровней организации. Аналитический подход показал свою эффективность при решении многих задач теории и практики. Но чем глубже внедряли аналитику, тем больше усиливались технические науки и хирели гуманитарные. Начались кризисы: политические, экономические, экологические и т.п.

В стремлении противодействовать этому возникло учение о холизме. Холизм – философия цельности – направление в философии, рассматривающее мир как результат творческой эволюции, которая направляется нематериальным «фактором цельности». Основоположник – Ян Смэтс, студентом написавший книгу "Эволюция личности", которую, правда, не опубликовал. Но в 1926 г. у него вышла книга "Холизм и эволюция". Когда Альберт Эйнштейн прочитал эту книгу, он сделал следующий прогноз: в грядущем тысячелетии холизм, – раньше или позже, – станет главной концепцией естествознания.

Можно утверждать, что холизм – крайнее проявление философии синергетики и системного анализа.

Ян Смэтс (1870-1950) – основатель философии холизма - премьер-министр Южно-Африканского союза, командир отрядами буров во время Англо-бурской войны в Трансваале, командующий британской армией в Восточной Африке, во время второй мировой войны – британский фельдмаршал, соавтор устава Лиги Наций, активный проводник политики апартеида.

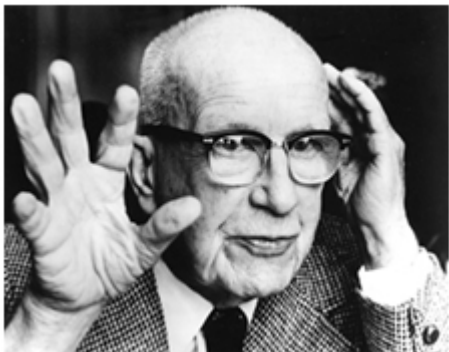
"Холизм не только созидателен, но и самосозидателен, и его конечные структуры гораздо более целостны, чем его первоначальные структуры". Я. Смэтс.

Три столетия научной революции качественно изменили картину окружающего нас мира, привели к доминированию аналитического подхода во всех областях человеческой деятельности: науке, технике, искусстве, морали. Целостный, гармоничный мир исчез. Но в середине 20-го века маятник пошёл в обратную сторону. Развитие общей теории сложных структур потребовало создания методологии рассмотрения сложных природных и общественных систем во всей их взаимосвязи. Началось



движение от анализа к синтезу. В методологию науки вошёл системный анализ, в котором нашлось место и синтезу. Синтез – соединение различных элементов объекта в единое целое (систему). Система – множество элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, образующих определенную целостность, единство. Системный подход – направление методологии научного познания, в основе которого лежит рассмотрение объектов как систем в целостности выявленных в нём многообразных типов связей. К сожалению, быстро выяснилось, что для понимания и тем более управления современными эволюционными процессами в природе и обществе одного системного подхода мало. Надежды сейчас возлагаются на развитие идей холизма, как философии цельности.

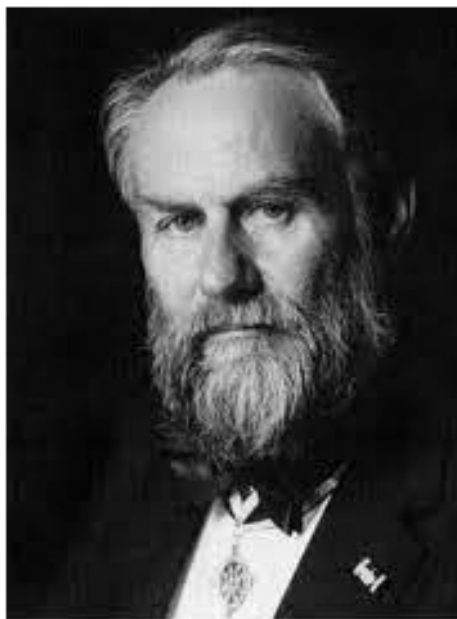
Между двумя крайностями: редуктивизмом и холизмом возникла промежуточная наука - синергетика, попытавшаяся установить связь между крайностями.



Ричард Фуллер (1895–1983) – автор термина синергетика: дизайнер, архитектор и изобретатель из США; не имея законченного образования, он получил множество почётных докторских научных степеней и полсотни международных премий. Основным его изобретением является лёгкий и прочный «геодезический купол» – пространственная стальная сетчатая оболочка из прямых стержней. Автор книг: "Синергетика: исследование геометрии мышления" (1975) и "Синергетика 2: дальнейшие исследования геометрии мышления" (1979), в которой высказана идея об упаковке шарами как основе организации

пространства. Под синергетикой Фуллер понимал геодезическую синергию, т.е. новую векторную геометрию, следствием которой и являются геодезические купола.

Определение термина «синергетика», близкое к современному пониманию (междисциплинарное научное направление, задачей которого является изучение природных



явлений и процессов на основе принципов самоорганизации систем), ввёл немецкий физик-теоретик Герман Хакен в 1977 г. в своей книге «Тайны природы. Синергетика – учение о взаимодействии». Именно он считается основателем науки синергетика. Согласно Хакену синергетика относится к направлению универсализма, занимающего промежуточное место между редукционизмом и холизмом. Синергетика не сводит поведение системы ни к её поведению на микроскопическом уровне (редукционизм), ни к её макроскопическому поведению (холизм), она пытается понять, как устанавливается и функционирует связь между этими двумя уровнями. Это удастся ей благодаря понятию параметров порядка и принципу подчинения.

Хакен Герман (род. 12.07.1927) — немецкий физик-теоретик, основатель синергетики, директор Института теоретической физики и синергетики университета Штутгарда, автор книг: Синергетика, Тайны природы, Принципы работы головного мозга, Тайны восприятия, Квантополевая теория твёрдого тела, Лазерная светодинамика, Информация и самоорганизация и др.

Handwritten signature or mark.

1.2 Неравновесная термодинамика

Теоретическую поддержку синергизму в плане сбора разъятых анализом частей в единое целое, оказала термодинамика, точнее - неравновесная термодинамика, которую активно развивал Илья Пригожин. Именно неравновесная термодинамика нанесла первый мощный удар по механистическому мировоззрению (хотя и не привела к созданию синергетики).

Неравновесная термодинамика — раздел термодинамики, изучающий системы вне состояния термодинамического равновесия и необратимые процессы. Возникновение этой области знания связано главным образом с тем, что подавляющее большинство встречающихся в природе систем находятся вдали от термодинамического равновесия. Основоположник - Л. Онзагер.

Широкое распространение механистического мировоззрения совпало с расцветом машинной цивилизации. Наука трактовала вселенную как гигантский механизм. Лаплас утверждал: существо, способное охватить всю совокупность данных о состоянии Вселенной в

любой момент времени, способно не только точно предсказать будущее, но и до мельчайших подробностей восстановить прошлое. Необычайно быстрое развитие фабричной цивилизации с большими достижениями инженерной мысли подтвердило правильность представления о Вселенной как о гигантской машине. Однако начавшийся в 20-ом веке закат индустриальной цивилизации продемонстрировал ограниченность механистической модели реальности.

Следует отметить, что термодинамика ещё в начале XIX века поставила под сомнение вневременной характер механистической картины мира. «Если бы мир был гигантской машиной, — провозгласила термодинамика, — то такая машина неизбежно должна была бы остановиться, так как запас полезной энергии рано или поздно был бы исчерпан». Мировые часы не могли идти вечно, и время обрело новый смысл.

Вскоре последователи Дарвина выдвинули идею, противоположную мировоззрению равновесной термодинамики. По мнению дарвинистов, действительно возможно, что мировая машина, расходуя энергию и переходя из более организованного в менее организованное состояние, замедляет свой ход и даже останавливаться, но биологические системы развиваются по восходящей линии, переходя из менее организованного в более организованное состояние. В начале XX в. Эйнштейн поместил наблюдателя внутрь системы. Мировая машина стала выглядеть



по-разному в зависимости от того, где находится наблюдатель, но она оставалась детерминистической машиной. Хотя физики, работавшие в области квантовой механики, и в частности занимавшиеся соотношением неопределенности, предприняли массированное наступление на детерминистическую модель, механистическая парадигма устояла и поныне образует центральное ядро науки в целом. Задача синергетики - нанести очередной удар по детерминизму.

Пригожин Илья Романович (1917-2003) — бельгийский и американский физик и химик, нобелевский лауреат по химии (1977), основатель и директор Центра по изучению сложных квантовых систем (СПА); им доказано существование неравновесных термодинамических систем, которые, при определённых условиях, поглощая вещество и энергию из окружающего пространства, могут совершать качественный скачок к усложнению (диссипативные структуры). Причём такой скачок не предсказывают классические законы термодинамики. Автор книг "Введение в термодинамику необратимых процессов", "Неравновесная статистическая механика", "Химическая термодинамика", "Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций", "Самоорганизация в неравновесных системах", "Порядок из хаоса", "Новый диалог человека с природой", "Познание сложного", "Молекулярная теория растворов", "Современная термодинамика" и др.

Развивая основы неравновесной термодинамики, Пригожин показал, что «универсальные законы» отнюдь не универсальны, а применимы лишь к локальным областям реальности. Его парадигма акцентирует внимание на таких аспектах, как разупорядоченность, неустойчивость, разнообразие, неравновесность, выражающиеся в нелинейных соотношениях, в которых малый сигнал на входе может вызвать сколь угодно сильный отклик на выходе, и темпоральности — повышенной чувствительности к ходу времени. Некоторые части Вселенной действительно могут действовать как механизмы. Таковы замкнутые системы, но они составляют лишь малую долю физической Вселенной. Большинство же систем, представляющих для нас интерес, открыты — они обмениваются энергией, веществом или информацией с окружающей средой. В мире господствуют не порядок, стабильность и равновесие, а, наоборот, неустойчивость и неравновесность, а порядок — лишь редкий частный случай.

Традиционная наука уделяет основное внимание устойчивости, порядку, однородности и равновесию. Она изучает главным образом замкнутые системы и линейные соотношения, в которых малый сигнал на входе вызывает равномерно во всей области определения малый отклик на выходе. Случайность не востребована в этой науке, оно — досадное недоразумение.

Школа Пригожина развивала классическую неравновесную термодинамику, основанную на фундаментальном предположении о локальном равновесии, которое предполагает, что равновесные термодинамические соотношения справедливы для термодинамических переменных, определенных в элементарном объеме. Считается, что рассматриваемая система может быть разделена в пространстве на множество элементарных ячеек, достаточно больших, чтобы рассматривать их как макроскопические системы, но и достаточно малых для того, чтобы состояние каждой из них было близко к состоянию равновесия. Данное предположение справедливо для широкого класса физических систем, что и определяет успех классической формулировки неравновесной термодинамики. Отметим, что предположение о локальном равновесии является грубым допущением для обширного класса систем и процессов. Примеры

включают в себя такие явления, как распространение ультразвука в газах, суспензии, растворы полимеров, гидродинамика фононов, ударные волны, разреженные газы и т.д. Способы преодоления этих недостатков мы рассмотрим в последующих лекциях данного курса.

Важным направлением неравновесной термодинамики является решение проблемы необратимости времени.

Напомним, что согласно традиционным представлениям, необратимость времени возникает не на фундаментальном уровне (где все элементарные процессы описываются обратимыми уравнениями Ньютона), а позднее – при усреднениях или учёте краевых и начальных условий. По мнению школы Пригожина, необратимость возникает на фундаментальном уровне вследствие конечной разрешающей способности прибора, с помощью которого производится наблюдение. Важно, что все системы содержат подсистемы, которые непрерывно флуктуируют. Иногда отдельная флуктуация или комбинация флуктуаций может стать (в результате положительной обратной связи) настолько сильной, что существовавшая прежде организация не выдерживает и разрушается. В этот переломный момент (точка бифуркации) принципиально невозможно предсказать, в каком направлении будет происходить дальнейшее развитие: станет ли состояние системы хаотическим или она перейдёт на новый, более дифференцированный и более высокий уровень упорядоченности или организации (диссипативную структуру).

Бифуркация (*bifurcus* — «раздвоенный») — термин, употребляемый для обозначения всевозможных качественных перестроек или метаморфоз различных объектов при изменении параметров, от которых они зависят. Изучением подобных систем занимается теория хаоса.

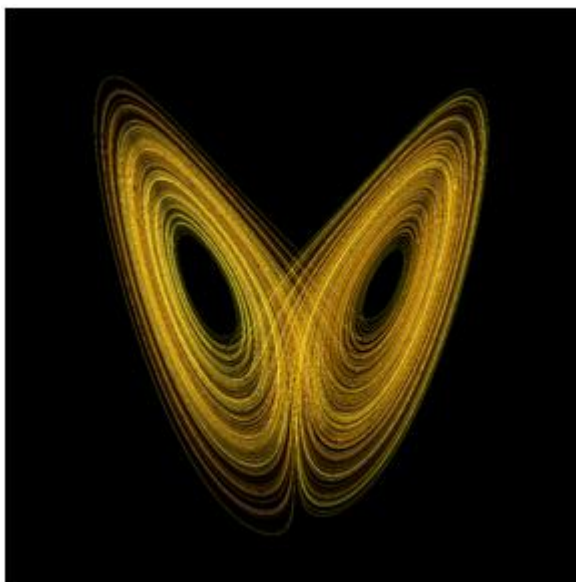


Рис.1 Фазовая диаграмма странного аттрактора Лоренца — пример нелинейной динамической системы.

Точка бифуркации — смена установившегося режима работы системы (термин из неравновесной термодинамики и синергетики), т.е. критическое состояние системы, при котором система становится неустойчивой относительно флуктуаций и возникает неопределенность: станет ли состояние системы хаотическим или она перейдет на новый, более дифференцированный и высокий уровень упорядоченности. Важный параметр в теории самоорганизации. Основным свойством точки бифуркации является непредсказуемость, т.к. обычно точка бифуркации имеет несколько веточек аттрактора (устойчивых режимов работы), по одному из которых пойдёт система. Однако заранее

невозможно предсказать, какой новый аттрактор займёт система. Кроме того, точка бифуркации носит кратковременный характер и разделяет более длительные устойчивые режимы системы.

Аттрактор (*attract* — привлекать, притягивать — компактное подмножество фазового пространства динамической системы, все траектории из некоторой окрестности которого стремятся к нему при времени, стремящемся к бесконечности. Аттрактором может являться притягивающая неподвижная точка (к примеру, в задаче о маятнике с трением о воздух), периодическая траектория (пример — самовозбуждающиеся колебания в контуре с положительной обратной связью), или некоторая ограниченная область с неустойчивыми траекториями внутри (как у странного аттрактора).

Теория бифуркаций динамических систем — это теория, которая изучает изменения качественной картины разбиения фазового пространства, в зависимости от изменения параметра (или нескольких параметров).

Динамическая система — математическая абстракция, предназначенная для описания и изучения эволюции систем во времени. Она может быть представлена как система, обладающая состоянием. При таком подходе, динамическая система описывает динамику некоторого процесса, а именно: процесс перехода системы из одного состояния в другое. Фазовое пространство системы — совокупность всех допустимых состояний динамической системы. Таким образом, динамическая система характеризуется своим начальным состоянием и законом, по которому система переходит из начального состояния в другое. Важнейшие понятия теории динамических систем — устойчивость (способность системы сколь угодно долго оставаться около положения равновесия или на заданном многообразии) и грубость (сохранение свойств при малых изменениях структуры динамической системы;

«грубая система — это такая, качественный характер движений которой не меняется при достаточно малом изменении параметров.

Диссипация энергии — переход части энергии упорядоченных процессов (кинетической энергии движущегося тела, энергии электрического тока и т. д.) в энергию неупорядоченных процессов, в конечном итоге — в тепло.

Диссипативные структуры — физические или химические структуры, для поддержания которых требуется больше энергии, чем для поддержания более простых структур, на смену которым они приходят. Это — устойчивые пространственно неоднородные структуры, возникающие в результате развития неустойчивостей в однородной неравновесной диссипативной среде.

Диссипативная система (*dissipatio* — «рассеиваю, разрушаю») — открытая система, оперирующая вдали от термодинамического равновесия, т.е. это устойчивое состояние, возникающее в неравновесной среде при условии диссипации (рассеивания) энергии, которая поступает извне. Диссипативная система — стационарная открытая система (неравновесная открытая система). Диссипативная система характеризуется спонтанным появлением сложной, зачастую хаотичной структуры. Отличительная особенность таких систем — несохранение объёма в фазовом пространстве, т.е. невыполнение теоремы Лиувилля. Примерами такой системы являются ячейки Бенара, лазеры, реакция Белоусова-Жаботинского и биологическая жизнь. Термин введён Пригожиным. Процесс «самоорганизации» происходит быстрее при наличии в системе внешних и внутренних «шумов», т.е. шумовые эффекты приводят к ускорению процесса «самоорганизации».

Идея Пригожина заключается в возможности спонтанного возникновения порядка и организации из беспорядка и хаоса в результате процесса самоорганизации. В состояниях, далеких от равновесия, происходят многие спонтанные, нередко весьма значительные перераспределения материи во времени и в пространстве. В таких состояниях очень слабые возмущения, или флуктуации, могут усиливаться до гигантских волн, разрушающих сложившуюся структуру, что объясняет всевозможные процессы качественного или резкого (не постепенного, не эволюционного) изменения. Эффекты, обнаруженные при изучении сильно неравновесных состояний и нелинейных процессов, в сочетании со сложными системами, наделёнными обратными связями, привели к созданию нового подхода, позволяющего установить связь фундаментальных наук с «периферийными» науками о жизни и понять некоторые социальные процессы.

В модели мира, построенной Ньютоном, любой момент времени в настоящем, прошлом и будущем был неотличим от любого другого момента времени. Планеты могли обращаться вокруг Солнца как вперед, так и назад по времени, ничего не изменяя в самих основах ньютоновской системы — идея обратимого времени.

После формулировки второго начала термодинамики внимание вновь было приковано к понятию времени. Дело в том, что согласно второму началу термодинамики запас энергии во Вселенной иссякает, а коль скоро мировая машина сбавляет обороты, неотвратимо приближаясь к тепловой смерти, ни один момент времени не тождествен предшествующему. Ход событий во Вселенной невозможно повернуть вспять, дабы воспрепятствовать возрастанию энтропии. События в целом невозпроизводимы, а это означает, что время обладает направленностью, т.е. существует стрела времени. Вселенная стареет, время утрачивает обратимость и становится необратимым.

Второе начало термодинамики — физический принцип, накладывающий ограничение на направление процессов передачи тепла между телами. Оно запрещает вечные двигатели второго рода, показывая, что коэффициент полезного действия не может равняться единице, поскольку для кругового процесса температура холодильника не может равняться абсолютному нулю. Второе начало термодинамики является постулатом, не доказываемым в рамках термодинамики. Оно было создано на основе обобщения опытных фактов и получило многочисленные экспериментальные подтверждения.

Энтропия (поворот, превращение) — в естественных науках мера неупорядоченности системы, состоящей из многих элементов. В статистической физике — мера вероятности осуществления какого-либо макроскопического состояния; в теории информации — мера неопределённости какого-либо опыта (испытания), который может иметь разные исходы, а значит, и количество информации; в исторической науке, для экспликации феномена альтернативности истории (инвариантности и вариативности исторического процесса). Энтропия в информатике — степень неполноты, неопределённости знаний. Энтропия — мера неупорядоченности системы. Явление, обратное энтропии, именуется негэнтропией. Понятие энтропии впервые было введено Клаузиусом в термодинамике (1865).

Стрелы времени — метафорическое название эмпирических индикаторов направления времени. Понятие введено А.Эддингтоном. В проблеме необратимости используются три стрелы времени: термодинамическая стрела, указывающая то направление времени, в котором возрастает энтропия (беспорядок); космологическая стрела времени, в направлении

которой происходит расширение Вселенной, и психологическая стрела или направление времени, соответствующее нашему ощущению непреклонного хода времени, направление накопления поступающей информации. Известны и ещё три: стрела времени, связанная с тем "предпочтением", которое природа оказывает запаздывающим волнам перед опережающими, т.е. "волновая стрела"; стрела, проявляющаяся в процессе распада Ко-мезона - единственная анизотропия времени, которая наблюдается в физике элементарных частиц; квантовомеханическая стрела, связанная с процедурой измерения в квантовой механике.

Возникновение термодинамики привело естествознание к расколу в связи с проблемой времени. Более того, даже те, кто считал время необратимым, вскоре разделились на два лагеря. Если запас энергии в системе тает, то способность системы поддерживать организованные структуры ослабевает, поэтому высокоорганизованные структуры распадаются на менее организованные, которые в большей мере наделены случайными элементами. Однако именно организация наделяет систему присущим ей разнообразием. По мере того как иссякает запас энергии и возрастает энтропия, в системе нивелируются различия. Следовательно, второе начало термодинамики предсказывает всё более однородное будущее (прогноз с человеческой точки зрения пессимистический).

Обратимся теперь к проблемам, поднятым Дарвином и его последователями. Экспериментально доказано, что вопреки предсказаниям термодинамики, эволюция не приводит к понижению уровня организации и обеднению разнообразия форм. Наоборот, эволюция развивается в противоположном направлении: от простого к сложному, от низших форм жизни к высшим, от недифференцированных структур к дифференцированным. С человеческой точки зрения, такой прогноз весьма оптимистичен. Старая, Вселенная обретает все более тонкую организацию. Со временем уровень организации Вселенной неуклонно повышается.

Пригожин попытался примирить термодинамиков с дарвинистами: по его мнению, стрела времени проявляет себя лишь в сочетании со случайностью. Только в том случае, когда система ведёт себя достаточно случайным образом, в её описании возникает различие между прошлым и будущим и, следовательно, необратимость.

В механистической, науке исходным рубежом событий служат начальные условия. Атомы или частицы движутся по мировым линиям, или траекториям. Задав начальные условия, мы можем выпустить из исходной мировой точки траекторию как назад по времени — в прошлое, так и вперед по времени — в будущее. С совершенно иной ситуацией мы сталкиваемся при рассмотрении некоторых химических реакций, например в случае, когда две жидкости, слитые в один сосуд, диффундируют до тех пор, пока смесь не станет однородной, или гомогенной. Обратная диффузия, которая приводила к разделению смеси на исходные компоненты, никогда не наблюдается. В любой момент времени смесь отличается от той, которая была в сосуде в предыдущий момент и будет в следующий. Весь процесс ориентирован во времени.

В классической науке такие направленные во времени процессы считались аномалиями, курьезами, обязанными своим происхождением выбору весьма маловероятных начальных условий. Однако оказалось, что такого рода нестационарные односторонне направленные во времени процессы отнюдь не являются отклонениями от мира с обратимым временем. Справедливо обратное утверждение: редким явлением следует считать обратимое время, связанное с замкнутыми системами. Связанные с открытостью системы и случайностью, необратимые процессы порождают высокие уровни организации, например диссипативные структуры.

Энтропия — не просто безостановочное соскальзывание системы к состоянию, лишённому какой бы то ни было организации. При определенных условиях энтропия становится прародительницей порядка.

Подход школы Пригожина к проблеме времени — синтез, охватывающий наряду с обратимым и необратимое время и показывающий взаимосвязь того и другого времени не только на уровне макроскопических, но и на уровне микроскопических и субмикроскопических явлений. Подчеркивая, что необратимое время - характерная особенность большей части Вселенной, Пригожин подрывает самые основы классической динамики. Выбор между обратимостью и необратимостью не является выбором одной из двух равноправных альтернатив. Обратимость присуща замкнутым системам, необратимость — всей остальной части Вселенной.

Утверждение, что при неравновесных условиях энтропия может производить не деградацию, а порядок, организацию и, в конечном счёте, жизнь, противоречит традиционным представлениям классической термодинамики. Энтропия, как источник организации, утрачивает характер жесткой альтернативы, возникающей перед системами в процессе эволюции: в то время как одни системы вырождаются, другие развиваются по восходящей линии и достигают более высокого уровня организации. Такой объединяющий, а не взаимоисключающий подход позволяет биологии и физике сосуществовать, вместо того чтобы находиться в противоборстве.

Еще один синтез, достигнутый неравновесной термодинамикой — установление нового отношения между случайностью и необходимостью. В Ветхом завете утверждается, что всё происходящее в этом мире заранее предустановлено. Однако оказалось, в реальном мире

случайность и предопределённость действуют попеременно. Сейчас стирающий всякие различия, обезличивающий подход старого детерминизма сменился подчеркивающим различия эволюционным подходом, основанным на использовании детерминаций. Учёные признали сосуществование случайного и необходимого, связанных между собой отношением не подчинения, а равноправного партнерства во Вселенной, одновременно организующего и дезорганизующего себя. В окружающем нас мире действуют и детерминизм, и случайность, причём необходимость и случайность великолепно согласуются, дополняя друг друга.

Согласно теории изменения, проистекающей из понятия диссипативной структуры, когда на систему, находящуюся в сильно неравновесном состоянии, действуют, угрожая её структуре, флуктуации, наступает критический момент — система достигает точки бифуркации. В точке бифуркации принципиально невозможно предсказать, в какое состояние перейдет система. Случайность подталкивает то, что остаётся от системы, на новый путь развития, а после того как путь (один из многих возможных) выбран, вновь вступает в силу детерминизм — и так до следующей точки бифуркации.

Строгие методы моделирования качественных изменений позволяют по-новому взглянуть на понятие катастрофы (революции). Знание, каким образом иерархия неустойчивостей порождает структурные изменения, проясняет теорию организации. Пригожину принадлежит оригинальная трактовка некоторых психологических процессов, например инновационной деятельности, в которой он усматривал связь с «несредним» поведением, аналогичным возникающему в неравновесных условиях. Его теория полезна для изучения коллективного поведения. Она предостерегает против принятия генетических или социобиологических объяснений малопонятных сторон социального поведения. Многое из того, что обычно относят за счёт действия тайных биологических пружин, в действительности порождается не «эгоистичными» детерминистскими генами, а социальными взаимодействиями в неравновесных условиях.

Синергетика потребовала создание нового математического аппарата, отличного от традиционных методов математической физики. Если ранее полагали, что простые универсальные законы существуют, познаваемы, а их использование будет исключительно полезным; как бы ни были сложны уравнения, следующие из этих законов, сколько бы их ни было, их удастся решить. Детерминизм задавал уверенность в том, что можно, решив уравнения, заглянуть как угодно далеко в будущее и в прошлое. Очередную поддержку такой подход получил с внедрением компьютеров. Мощная вычислительная техника позволила решать системы из тысяч уравнений. Однако революционных прорывов не случилось, к тому же оказалось, что современная математика позволяет решить далеко не все задачи. Например, в теории динамического хаоса — важной области нелинейной науки — было показано, что даже для довольно простых детерминированных систем (в которых будущее однозначно определяется настоящим) существует горизонт прогноза, за который нельзя, какую бы мощную вычислительную технику и какие бы эффективные алгоритмы исследователи ни использовали. Кроме того, теория самоорганизованной критичности показывает, что для многих сложных иерархических систем типичны редкие катастрофические события. Поэтому определить необходимые параметры, опираясь на предысторию, для таких объектов достаточно сложно.

Системный анализ в свое время позволил продвинуться в изучении сложных систем. Но он хоть и системный, но анализ, т.е. способ выделения отдельных свойств и качеств. В то же время остро ощущается необходимость в системном, целостном представлении об объекте. С этой целью был создан системный синтез — составная часть синергетики. Он позволил прояснить каким образом происходит процесс самоорганизации в природе, и можно ли его как-то скопировать для развития компьютерных систем. Системный синтез облегчает выбор стратегии развития, позволяет перейти от баз данных к базам знаний, осуществить самоорганизацию в пространстве знаний и навыков.

1.3 Синергетика и самоорганизующиеся системы

Под синергизмом понимают совместное действие для достижения общей цели, основанное на принципе, что целое представляет нечто большее, чем сумма его частей. Синергизм означает превышение совокупным результатом суммы слагающих его факторов. Синергический эффект бывает как положительным ($2+2>4$), так и отрицательным, вредным ($2+2<4$). В медицине синергизм — объединенное действие двух лекарственных препаратов, которое оказывается сильнее, чем сумма действий этих двух лекарств, при их раздельном использовании. В политике синергизм — комбинированное воздействие на политические, социальные, экономические организации, институты, системы, при котором суммированный эффект превышает действие, совершаемое каждым компонентом в отдельности. Примерами синергизма являются: соединение двух и более кусков радиоактивного материала, при превышении критической массы дают выделение энергии, превосходящее излучение энергии простого суммирования отдельных кусков; знания и усилия нескольких человек можно организовывать таким образом, что они взаимно усиливаются;

прибыль после слияния двух компаний может превосходить сумму прибылей этих компаний до объединения; обмен идеями и т.п.

На синергизме и синергетических эффектах строится наука синергетика.

Синергетика – это теория самоорганизации в системах различной природы. Эта наука имеет дело с явлениями и процессами, в результате которых у системы – у целого – могут появиться свойства, которыми не обладает ни одна из частей. Поскольку речь идёт о выявлении и использовании общих закономерностей в различных областях, то этот подход предполагает междисциплинарность, которая означает сотрудничество в разработке синергетики представителей различных научных дисциплин.

Самоорганизующаяся система — динамическая адаптивная система, в которой запоминание информации (накопление опыта) выражается в изменении структуры системы.

Адаптивная система (самоприспосабливающаяся система) — система, автоматически изменяющая данные алгоритма своего функционирования и (иногда) свою структуру с целью сохранения или достижения оптимального состояния при изменении внешних условий.

Саморазвивающаяся система — динамическая система, самостоятельно выбирающая цели своего развития и критерии их достижения; изменяет свои параметры, структуру и другие характеристики в заданном направлении.

Обычно под синергетикой понимают энергию совместного действия. Это - междисциплинарное направление, которое занимается изучением систем, состоящих из многих подсистем различной природы (электронов, атомов, молекул, клеток, нейронов, механических элементов, органов животных, людей, транспортных средств и т.п.), и выявлением того, каким образом взаимодействие таких подсистем приводит к возникновению пространственных, временных или пространственно-временных структур в макроскопическом масштабе. Синергетика представляет собой новую обобщающую науку, изучающую основные законы самоорганизации сложных систем. В неё входят такие области, как нелинейная динамика, хаос, фракталы, катастрофы, бифуркации, волны, солитоны, полевые эффекты и т.д. Синергетика предоставляет язык, на котором могут общаться математики, физики, химики, биологи, психологи и др.

Синергетика изучает многовариантное и неоднозначное поведение многоэлементных структур, которые не деградируют к стандартному для замкнутых систем усреднению термодинамического типа, а развиваются вследствие открытости, притока энергии извне, нелинейности внутренних процессов, появления особых режимов с обострением и наличия более одного устойчивого состояния. К этим системам неприменимы ни второе начало термодинамики, ни теорема Пригожина о минимуме скорости производства энтропии; в них происходит образование новых структур и систем, в том числе и более сложных, чем исходные. В отдельных случаях образование новых структур имеет регулярный, волновой характер, и тогда они называются автоволновыми процессами.

К интересам синергетики относят явления, возникающие от совместного действия нескольких разных факторов, в то время, как каждый фактор в отдельности к этому явлению не приводит. Синергетику также можно определить как науку о самоорганизации, под которой понимают самопроизвольное усложнение формы, или структуры системы при медленном и плавном изменении её параметров (пример — ячейки Бенара). Иногда под синергетикой понимают науку о неожиданных явлениях, поскольку любое качественное изменение состояния системы производит впечатление неожиданного (хотя причина известна - неустойчивость). Анализ, вскрывающий причину неожиданного явления, и составляет предмет синергетики. Математический аппарат, используемый в синергетике, - теория динамических систем.

Как известно, природные системы устойчивы относительно внешних воздействий, обладают свойствами самообновляемости, самоусложнению, росту, развитию. Они характеризуются согласованностью всех составных частей. Напротив, для техногенных систем свойственны резкие ухудшения функционирования даже при сравнительно небольшом изменении внешних воздействий или ошибках в управлении. Поэтому желательно использовать опыт природы в деятельности человека. Отсюда вытекает одна из задач синергетики - выяснение законов возникновения упорядоченности, её развития и самоусложнения. Проблема оптимальной упорядоченности и организации важна при решении энергетических, экологических и других глобальных проблем.

Математический аппарат синергетики достаточно сложен, но всё же недостаточен для решения задач, стоящих перед этой наукой. Как известно, традиционная математическая физика использует линейные дифференциальные уравнения в частных производных, т.е. уравнений с неизвестными в первой степени. Системы таких уравнений описывают процессы, которые с увеличением интенсивности внешних воздействий претерпевают только количественные изменения, а новых качеств не возникает. Они применяются в квантовой механике, электродинамике, теории волн, сопротивлении материалов, теплопроводности и диффузии. Однако существуют явления, которые при интенсивном внешнем воздействии приобретают новые качества и начинают протекать по изменённому закону. Описываются они нелинейными уравнениями, решение которых аналитическими методами невозможно, а численными -

затруднительно. Поэтому одна из серьёзных задач синергетики — разработка адекватного математического аппарата, способного описывать эволюцию сложных систем.

Достаточно важно, что синергетика опирается на методы, применимые к различным наукам и изучает многокомпонентные системы безотносительно к их природе. Кроме того, она занимается многими областями, оказавшимися за пределами традиционных наук. Например, термодинамика и теория информации изучают статику, тогда как для синергетики основной интерес представляет динамика. Неравновесные фазовые переходы синергетических систем, включая колебания, пространственно-временные структуры и хаос, отличаются несравненно большим разнообразием, чем фазовые переходы систем, находящихся в состоянии теплового равновесия. В отличие от кибернетики, занимающейся разработкой алгоритмов и методов, позволяющих управлять системой так, чтобы та функционировала заданным образом, синергетика изучает самоорганизацию системы при произвольном изменении управляющих параметров. В отличие от теории динамических систем, которая игнорирует флуктуации в точках бифуркации, синергетика изучает стохастическую динамику во всей её полноте в подпространстве зависящих от времени управляющих параметров.

Важная особенность синергетических систем состоит в том, что ими можно управлять извне, изменяя действующие на системы факторы. Например, скорость роста клеток можно регулировать, обрабатывая клетки различными химическими веществами. Временная эволюция синергетических систем зависит от причин, которые не могут быть предсказаны с абсолютной точностью. Непредсказуемость поведения таких систем связана не только с неполнотой информации о состоянии из многочисленных подсистем и квантовыми флуктуациями, но и с тем, что их эволюция очень чувствительна к начальным условиям. Даже небольшое различие в начальных условиях коренным образом изменяет последующую эволюцию системы. В процессе временной эволюции синергетическая система, находящаяся в одном состоянии, переходит в новое состояние, при этом не все параметры состояния имеют одинаковое значение, и одни параметры состояния можно выразить через другие, в результате чего количество независимых переменных уменьшается. Синергетика — наука, направленная на согласованность взаимодействия частей при образовании структуры как единого целого.

Теория синергетики в основном состоит из нескольких частей:

1. Статистическая физика в приложении к описанию существенно неравновесных процессов, в рамках которой создаются кинетические модели, определяются параметры, необходимые для её описания, выявляются корреляции, крупномасштабные флуктуации, устанавливаются закономерности перехода в состояние равновесия.

2. Термодинамика открытых систем в приложении к изучению стационарных состояний, сохраняющих устойчивость в определённом диапазоне внешних условий, поиск условий самоорганизации, т.е. возникновения упорядоченных структур из неупорядоченных при диссипации энергии.

3. Теория динамического хаоса, исследующая сверхсложную, скрытую упорядоченность поведения наблюдаемой системы; например, явление турбулентности.

4. Теория катастроф, базирующаяся на нелинейных дифференциальных уравнениях, определяющих состояния далёкие от равновесия и зависящие от входящих параметров. С её помощью определяются границы устойчивости и изменения структуры состояний. Исследует поведение самоорганизующихся систем в терминах бифуркации, аттрактора, неустойчивости.

5. Теория фракталов, занимающаяся изучением сложных самоподобных структур, часто возникающих в результате самоорганизации; сам процесс самоорганизации также может быть фрактальным.

Математический аппарат синергетики скомбинирован из разных отраслей теоретической физики: нелинейной неравновесной термодинамики, теории катастроф, теории групп, тензорного анализа, дифференциальной топологии неравновесной статистической физики. Методология синергетики распространяется на многие науки: от физики твёрдого тела и лазерной техники и до биофизики и проблем искусственного интеллекта. Известны такие разделы синергетики, как лингвистическая синергетика и прогностика, семантическая синергетика и др.

Феномен появления упорядоченных структур трактуется синергетикой как всеобщий механизм наблюдаемого в природе направления эволюции: от элементарного и примитивного — к сложносоставному и более совершенному. С мировоззренческой точки зрения синергетику позиционируют как универсальную теорию эволюции, дающую единую основу для описания механизмов возникновения любых новаций, подобно тому, как некогда кибернетика определялась, как «универсальная теория управления», одинаково пригодная для описания любых операций регулирования и оптимизации: в природе, в технике, в обществе и т. д. Однако время показало, что всеобщий кибернетический подход оправдал далеко не все возлагавшиеся на него надежды. Аналогичным образом, и расширительное толкование применимости методов синергетики также подвергается критике.

Дело в том, что область исследований синергетики чётко не определена и вряд ли может быть ограничена, так как её интересы распространяются на все отрасли естествознания. Общим

признаком является рассмотрение динамики любых необратимых процессов и возникновения принципиальных новаций.

Синергетика находится на начальной стадии развития: неизвестно - станет ли она законченной наукой или постепенно свернётся, как это произошло с кибернетикой. Сейчас этим термином пользуются далеко не все учёные. Так, представители школы Пригожина, усилиями которых разрабатывалась математическая теория поведения диссипативных структур, и создавались мировоззренческие основания теории самоорганизации, как парадигмы универсального эволюционизма, никогда не используют термин «синергетика». О коллективных явлениях они не вспоминают, а предпочитают называть разработанную ими методологию «теорией диссипативных структур» или просто "неравновесной термодинамикой", подчёркивая преемственность своей школы пионерским работам Ларса Онзагера в области необратимых химических реакций.

Противники создания синергетики, как новой науки указывают на то, что неологизмы от слова "синергена" уже неоднократно использовались. Кроме того, термин синергетика имеет два разных значения: содействие и сотрудничество, что вредно при введении специальной науки. К тому же, многое из того, что стали относить к синергетике, давно принадлежит системному анализу.

Известно, что между поведением совершенно различных систем, изучаемых различными науками, существуют аналогии. Изучаемые синергетикой системы как раз и относятся к компетенции различных наук, причём одновременно другие науки приносят в синергетику свои идеи. В настоящее время назрела острая необходимость в создании особой науки, которая объединила бы науки, интересующиеся самоорганизацией систем. Но станет ли такой наукой синергетика? Это вопрос...

Синергетика претендует на то, что в её руках есть набор методов, универсально полезных при изучении самых разнообразных явлений самоорганизации. Более того, синергетики уверены в том, что они нацелены на изучение самоорганизации и только её, тогда как все остальные дисциплины рассматривают этот феномен лишь в ряду других явлений, относящихся к их предмету. Но если основной предмет синергизма - самоорганизация, то может быть и следует называть новую науку наукой о самоорганизации? Впрочем, возможно, что когда разовьётся теория самоорганизации, то её и будут называть синергетикой. Просто ради краткости.

Не менее сильную оппозицию синергетика встретила в среде физиков, химиков, биологов, занимающихся автоволновыми процессами. Учёные, работающие в этих областях, утверждают, что многие явления, которые синергетика стремится описать, давно известны, и описаны, в частности в теории автоволновых процессов. И что само введение новой терминологии лишь затемняет дело. Сторонников синергетики обвиняют в словесной эквилибристике, в попытках эксплуатировать модные тенденции к синтезу любой ценой.

Тем не менее, идеи Хакена были подхвачены с поразительной быстротой. Связано это с тем, что у многих учёных возник страх перед углубляющейся специализацией. Раздались призывы унифицировать язык науки. Поэтому лозунг синтеза знаний о природе, и призывы к кардинальному синтезу науки культуры, мгновенно подхватывались. Но после первых восторгов встал вопрос: а есть ли фундамент для нового объединения? И если есть, то насколько он основательный?

Синергетика, как наука, основывается на том, что синергетический подход хорошо работает при описании процессов, имеющих кооперативный, самосогласованный, "синергетический" характер. Важным успехом этой науки явился синтез в рамках синергетического подхода теории диссипативных структур (создана вне синергизма), с теорией фазовых переходов и квантовой генерации. В синергетическом подходе реализована дополнительность одних методов и теорий по отношению к другим. Например, в рамках исследования диссипативных структур оказалось, что макродинамические методы анализа системы и термодинамические способы ограничивают область применения друг друга.

В настоящее время происходит становление методологии новой науки. Удастся ли ей утвердиться в своих правах, покажет время.

При рассмотрении перспектив развития синергетики можно ожидать, что эта наука окажется полезной при дальнейшем развитии концепции устойчивого развития; решения проблемы гонки вооружений; разработке и внедрения новых технологий, например, глобальной системы телекоммуникаций, микромашин, нанотехнологий (создание микросхем, новых катализаторов и выращивание отдельных органов человека; освоение процессов самоорганизации и самоформирования различных структур на этих масштабах); в создании новых поколений вычислительных комплексов, в том числе - квантовых компьютеров; в развитии социальных организмов в постиндустриальную эпоху; в понимании возможности человека воспринимать информацию с помощью своих органов чувств и воздействовать на окружающее; в описании особенностей экономических кризисов, способов их предотвращения и путей выхода из них; в построении на основе методов и представлений нелинейной динамики модели исторических

процессов; в анализе системных механизмов демографических процессов; в математической психологии.

Ожидается, что синергетика окажется полезной в сфере изучения структур, связанных с возникновением упорядоченности в пространстве скоростей. Они активно исследуются в связи с задачами физики плазмы, с проектами управляемого термоядерного синтеза, астрофизическими проблемами, различными плазменными технологиями. Анализ этих задач требует кинетического описания вещества, совершенных алгоритмов, суперкомпьютеров. Лазеры, в которых выходящее излучение каким-то образом подаётся на вход, служат объектом моделирования и экспериментального исследования. Это моделирование требует привлечения одного из самых сложных объектов современной прикладной математики – дифференциальных уравнений с запаздыванием. Классические уравнения с запаздыванием, например уравнение Хатчинсона, при большом запаздывании трудно исследовать численно. Поэтому на передний план выходят асимптотические подходы, на которые можно опираться, исследуя модели. Возникла положительная обратная связь – оптоэлектроника; новые технологии требуют нового математического аппарата, а последний позволяет обнаруживать новые режимы генерации, которые находят практическое применение.

Одной из основных технологий постиндустриальной эпохи становятся методики прогноза. Прорыв в этой области связан с теорией самоорганизованной критичности, позволившей с единой точки зрения взглянуть на сложные системы, в которых возможны редкие катастрофические события. Это касается землетрясений и биржевых крахов, наводнений и инцидентов с хранением ядерного оружия, многих типов техногенных аварий и утечки конфиденциальной информации.

Перспективы синергетики связывают с возможностью обеспечения целеполагания, планирования, т.е. проектирования будущего.

Возможно, уже в этом веке возникнет новая мета-наука, объединяющая гуманитарные и естественнонаучные знания, и может быть это будет синергетика.

Лекция 2. ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Синергетика — короткое название теории сложных систем, в первую очередь — динамических (упорядоченных или в той или иной мере хаотических).

В мире есть порядок и упорядоченные структуры, есть беспорядок и случайные явления, есть хаос, т.е. беспорядок в абсолюте. Есть и детерминированный хаос, т.е. беспорядок, в той или иной мере упорядоченный, со случайными процессами, которые частично предопределены и даже закономерны.

Интерес к динамическому хаосу связан с тем, что это явление встречается в нелинейных системах самой различной физической природы и может найти ряд важных практических приложений. Хаотические колебания могут возникать в строго детерминированных системах, но обладают рядом свойств, делающих их похожими на случайные колебания. Образуя новый класс сложных, широкополосных сигналов, легко реализуемых в электронных схемах, они претендуют в радиотехнике на роль переносчиков информации для систем скрытной связи.

В этой лекции мы на качественном уровне рассмотрим особенности детерминированного хаоса применительно к динамическим (диссипативным) системам.

2.1 Порядок и хаос

В природе и обществе непрерывно происходит борьба порядка и хаоса.

Порядок — гармоничное, ожидаемое, предсказуемое состояние или расположение чего-либо.

Упорядоченность — характеристика структуры, обозначающая степень взаимной согласованности её элементов.

В этой лекции порядок (детерминизм) будет означать возможность однозначного предсказания состояния системы в любой момент времени, исходя из начальных условий.

Хаос — аperiодическое детерминированное поведение динамической системы, очень чувствительное к начальным условиям. Бесконечно малое возмущение граничных условий для хаотической динамической системы приводит к конечному изменению траектории в фазовом пространстве

Фазовая траектория — траектория перемещения точки, отображающей состояние динамической системы, в фазовом пространстве.

Мы будем считать, что хаос — предельный случай беспорядка. Далее хаос для нас будет означать полную непредсказуемость системы, нерегулярность движения, неповторяемость траекторий.

Таким образом, порядок — это чёткая, подчиняющаяся определенному порядку смена событий в окружающем нас пространстве и во времени. В теории динамических систем под порядком понимают детерминированный процесс, т.е. процесс, каждый шаг которого предопределен некоторыми закономерностями, которые хорошо известны, так что со 100% вероятностью предсказать эволюцию системы.

Хаотический процесс случаен — управлять им нельзя. Предсказать развитие такого процесса невозможно, можно лишь ставить вопрос о вероятности того или иного варианта его эволюции. Примерами хаотических процессов являются: метание шарика в рулетке, броуновское движение частицы под случайными ударами «соседей», беспорядочные вихри турбулентности, образующиеся при течении жидкости с достаточно большой скоростью, поезда, идущие, когда хотят и куда хотят.

Важным видом хаоса является белый шум (шумовой хаос или дробный шум).

Шум — беспорядочные колебания различной физической природы, отличающиеся сложностью временной и спектральной структуры. Может быть стационарным и нестационарным.

Белый шум — стационарный шум, спектральные составляющие которого равномерно распределены по всему диапазону задействованных частот. Примером белого шума является шум близкого водопада. Название получил от белого света, содержащего электромагнитные волны частот всего видимого диапазона электромагнитного излучения.

Следует различать случайные и хаотические движения. Первый термин относится к ситуациям, когда действующие силы неизвестны или известны только некоторые статистические характеристики параметров. Термин «хаотический» применяется в тех детерминированных задачах, где отсутствуют случайные или непредсказуемые силы или параметры, и траектории движений которых обнаруживают сильную зависимость от начальных условий.

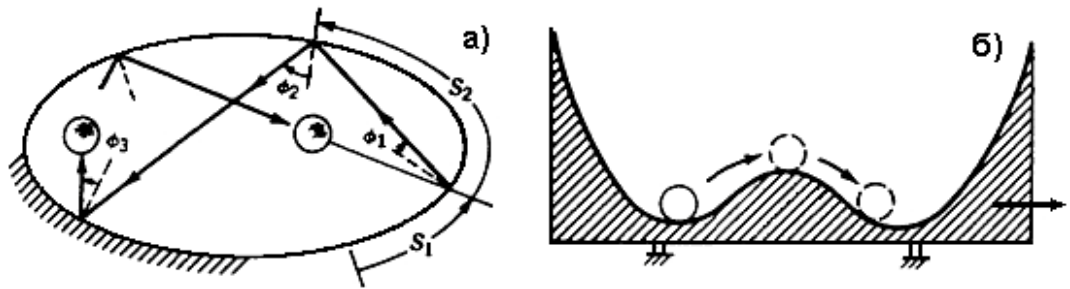


Рис. 2. а — Движение шарика после нескольких соударений с бортами бильярдного стола эллиптической формы. Это движение можно описать дискретным набором чисел (s_i, j_i) , называемым отображением; б — движение частицы в паре потенциальных ям под действием периодического возбуждения. При определённых условиях частица периодически перескакивает слева (L) направо (R) и обратно: LRLR... или LLRLRL... и т.д. При других условиях перескоки хаотичны, т.е. последовательность символов L и R неупорядочена.

Классическими примерами хаоса являются азартные игры. Однако азартные игры - недетерминированный процесс, поскольку в них много случайностей. Хотя теория хаотических динамических систем и использует методы теории вероятности, но не является частью математической статистики. Хаос — некоторый случайный процесс, наблюдаемый в динамических системах, не подверженных влиянию шумов или каких-либо случайных сил.

Оказалось, что многие вполне детерминированные системы могут обладать хаотическим непредсказуемым поведением. "Случайный" процесс оказывается решением одного или нескольких простых, дифференциальных уравнений. Отсюда возникает проблема непредсказуемости долговременного поведения детерминированных хаотических систем и необходимости использования статистического описания (однако вне рамок математической статистики!).

На рис.2 показаны два примера механических систем, динамика которых хаотична. Первый пример - эксперимент с шаром, который ударяется и отскакивает от сторон эллиптического бильярдного стола. Если соударения упругие, то энергия сохраняется, но для эллиптических столов шар блуждает по столу, никогда не повторяя свою траекторию. Другой эксперимент - шар в потенциале, состоящем из двух ям. Если стол, на котором стоит прибор не колеблется, то такой шар имеет два состояния равновесия. Однако, если стол колеблется, совершая периодическое движение достаточно большой амплитуды, шар начинает беспорядочно перепрыгивать из одной ямы в другую; таким образом, периодическое воздействие на него частоте вызывает неупорядоченный отклик с широким спектром частот. Возбуждение непрерывного спектра частот, расположенного ниже частоты воздействия, является одной из особенностей хаотических колебаний (рис. 3).

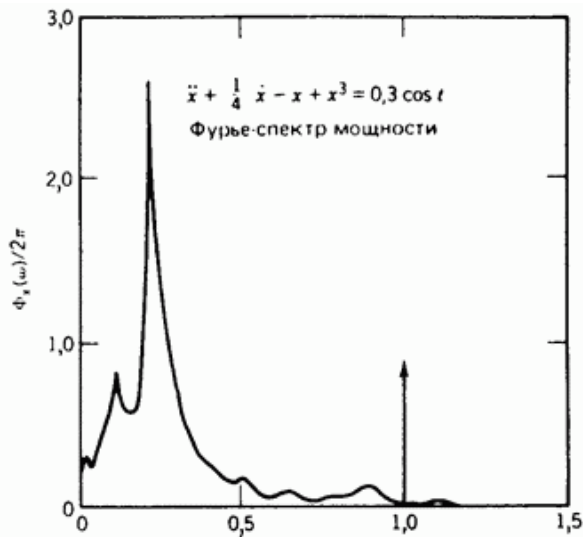


Рис. 3. Спектр мощности (преобразование Фурье) хаотического движения в паре потенциальных ям.

Другое свойство хаотических систем - потеря информации о начальных условиях. Пусть координата измерена с точностью Δx , а скорость - с точностью Δv . Разделим плоскость координата-скорость (фазовую плоскость) на ячейки площадью

$\Delta x \Delta v$ (рис. 4). Если начальные условия заданы точно, то система находится где-то в заштрихованной области на фазовой плоскости. Но если система хаотична, то эта неопределённость со временем растёт, увеличиваясь до размера $N(t)$ ячеек (рис. 2б). Увеличение неопределённости, описываемое законом

$$N \approx N_0 e^{ht}, \quad (1)$$

является вторым характерным свойством хаотических систем. Постоянная h связана с энтропией (теория информации) и показателем Ляпунова (мера скорости разбегания близких траекторий системы).

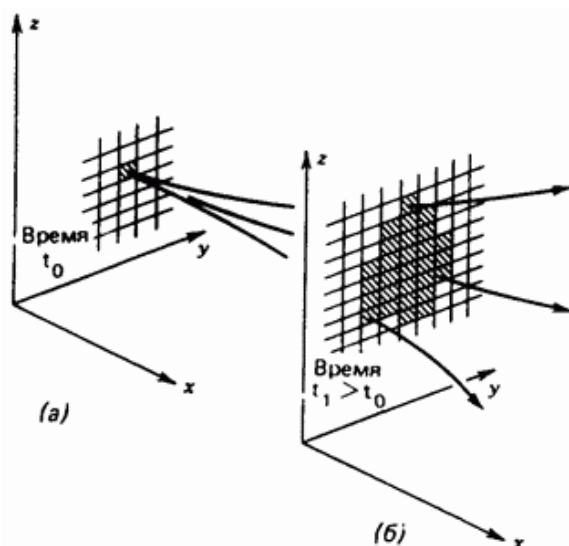


Рис. 4. Иллюстрация увеличения неопределённости, или потери информации в динамической системе. Заштрихованный квадрат в момент времени $t=t_0$ показывает неопределённость знания начальных условий.

Между крайностями: порядком и хаосом располагается обширная область детерминированного (в какой-то мере упорядоченного) хаоса. *Детерминированный хаос* относится к ограниченной случайности, им можно управлять и даже прогнозировать на короткие промежутки времени вперёд.

Напомним, что принцип детерминизма гласит: если мы знаем текущее состояние какой-либо системы и законы её эволюции, то мы можем предсказать будущее поведение этой системы. Пример: классическая ньютоновская

«механическая» Вселенная, в которой положение планет походит на движение стрелок многострелочных часов. Здесь будущее предсказывается однозначно. Однако, в природе есть системы, полностью детерминистические в ньютоновском смысле, но их будущее в определённом интервале параметров принципиально нельзя рассчитать. Это явление известно как *детерминированный хаос*, или *теория хаоса*. Далее под детерминированным хаосом будем полагать систему, которая без шумов и случайностей ведёт себя хаотически.

Далее мы будем рассматривать ситуации, когда случайный процесс становится детерминированным, а в детерминированном процессе обнаруживаются элементы случайного, хаотического поведения.

Примерами подобных систем являются атмосфера, турбулентные потоки, некоторые виды аритмий сердца, биологические популяции, общество, как система коммуникаций и его подсистемы: экономические, политические и другие социальные системы, частично кристаллические полимеры и др.

Ещё пример детерминистического хаоса - вода горных потоков. Если бросить в эту речку два листика, один за другим, то ниже по течению они, вероятнее всего, окажутся далеко друг от друга. В системе, подобной этой, небольшое различие в начальных условиях (положение листиков) приводит к большому расхождению на выходе. Можем мы предсказать результат бильярдной игры? Нет! Даже задача с бильярдным шаром, отскакивающим от бортов на совершенно ровном столе, растворяется в неопределённости вследствие неточностей в измерении угла, под которым шар приближается к борту в самом начале.

Поведение детерминированной системы кажется случайным, хотя оно определяется детерминированными законами.

Причиной появления хаоса является неустойчивость (чувствительность) по отношению к начальным условиям и параметрам: малое изменение начального условия со временем приводит к сколь угодно большим изменениям динамики системы (рис.). Так как начальное состояние физической системы не может быть задано абсолютно точно (например, из-за ограничений измерительных инструментов), то всегда необходимо рассматривать некоторую (пусть и очень маленькую) область начальных условий. При движении в ограниченной области пространства экспоненциальная расхожимость с течением времени близких орбит приводит к перемешиванию начальных точек по всей области. После такого перемешивания бессмысленно говорить о координате частицы, но можно найти вероятность её нахождения в некоторой точке.

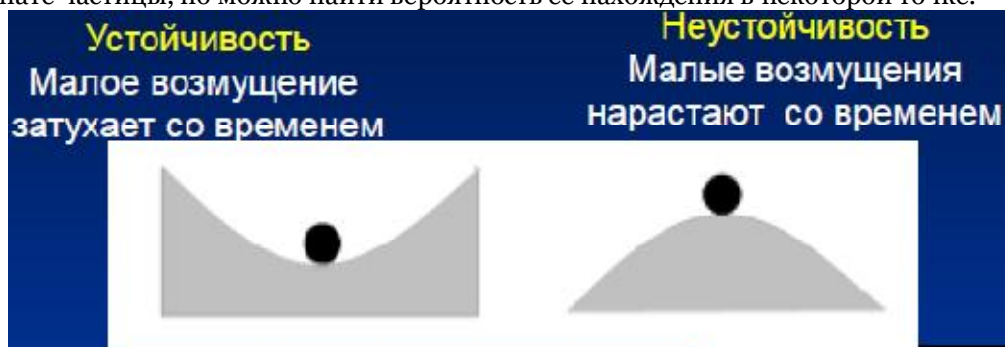


Рис. 5. Устойчивые и неустойчивые системы.

Примером неустойчивой динамической системы является двумерный газ Генриха Лоренца (начало XX века). Она состоит из кружков одинакового радиуса — рассеивателей, случайным образом разбросанных по плоскости, и материальной точки (частицы), которая движется с постоянной скоростью между ними, испытывая каждый раз зеркальное отражение при столкновении. В неустойчивости такой системы можно убедиться, рассмотрев две близких траектории частицы, выходящих из одной точки. Из представленного рис. 6 видно, что уже после двух актов рассеяния угол между траекториями, первоначально меньший 1° , становится больше, чем $\pi/2$. Таким образом, первоначально близкие траектории очень быстро расходятся. Иногда в таких случаях говорят, что происходит "забывание" частицей начальных условий. (Здесь под термином "забывание" имеется в виду, что при малом варьировании начальных условий статистические свойства траекторий никак не меняются). При малых временах предсказания поведения системы еще возможны, однако, начиная с некоторого времени приходится использовать статистический подход.

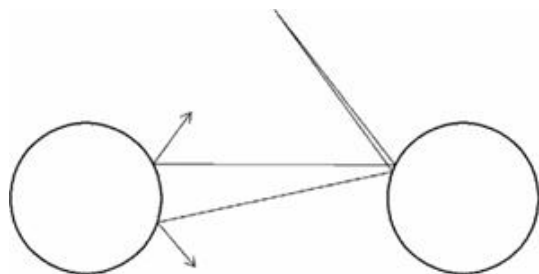


Рис. 6. "Потеря памяти" и расхожимость близких траекторий в результате неустойчивости движения в двумерном газе Г.Лоренца.

Важным обстоятельством является тот факт, что степень упорядоченности хаоса довольно часто можно рассчитать. Меру даёт геометрия фракталов. Этим мы займёмся в последующих лекциях данного курса.

2.2 Виды сложных систем

Как известно, задача предсказания поведения изучаемой системы во времени и пространстве на основе определенных знаний о его начальном состоянии сводится к нахождению некоторого закона, который позволяет по имеющейся информации об объекте в начальный момент времени в некоторой точке пространства определить его будущее в любой следующий момент времени. В зависимости от степени сложности самого объекта этот закон может быть детерминированным или вероятностным, может описывать эволюцию объекта только во времени, только в пространстве, а может описывать пространственно-временную эволюцию.

Существуют различные типы систем.

Консервативная система — физическая система, работа консервативных сил которой равна нулю и для которой имеет место закон сохранения механической энергии, т. е. сумма кинетической энергии и потенциальной энергии системы постоянна. Объём в фазовом пространстве постоянен. Примерами консервативной системы служит солнечная система и колеблющийся маятник (если пренебречь трением в оси подвеса и сопротивлением воздуха).

Динамическая система — математическая абстракция, предназначенная для описания и изучения эволюции систем во времени. Это система, обладающая состоянием. Она описывает динамику некоторого процесса, а именно: процесс перехода системы из одного состояния в другое. Фазовое пространство системы — совокупность всех допустимых состояний динамической системы. Таким образом, динамическая система характеризуется своим начальным состоянием и законом, по которому система переходит из начального состояния в другое. Динамическая система характеризуется устойчивостью (способность системы сколь угодно долго оставаться около положения равновесия или на заданном многообразии) и грубостью (сохранение свойств при малых изменениях структуры динамической системы; «грубая система — это такая, качественный характер движений которой не меняется при достаточно малом изменении параметров).

Частным случаем динамической системы является диссипативная система - открытая динамическая система, в которой наблюдается прирост энтропии.

Диссипативная система — открытая система, которая оперирует вдали от термодинамического равновесия. Это устойчивое состояние, возникающее в неравновесной среде при условии диссипации (рассеивания) энергии, которая поступает извне. Характеризуется спонтанным появлением сложной, зачастую хаотичной структуры. Отличительная особенность таких систем — несохранение объёма в фазовом пространстве.

Динамическая система - любой объект или процесс, для которого однозначно определено понятие состояния как совокупности некоторых величин в данный момент времени и задан закон, который описывает изменение (эволюцию) начального состояния с течением времени. Этот закон позволяет по начальному состоянию прогнозировать будущее состояние динамической системы.



Математический аппарат, используемый для количественного описания закона эволюции динамических систем основан на использовании дифференциальных уравнений, дискретных отображений, теории графов, теории марковских цепей и т.д. Математическая модель динамической системы считается заданной, если введены параметры (координаты) системы, определяющие однозначно её состояние, и указан закон эволюции.

Таким образом, динамическая система = набор параметров + оператор эволюции.

Эволюция системы может описываться и дифференциальными уравнениями и отображениями (уравнениями с дискретным временем).

Динамические системы могут описываться линейными (линейные системы) или нелинейными (нелинейные системы) уравнениями. Возможны системы с непрерывным и дискретным (каскады) временем. Важную группу динамических систем представляют системы, в которых возможны колебания. Различают линейные и нелинейные колебательные системы, сосредоточенные и распределенные, консервативные и диссипативные, автономные и неавтономные. Особый класс представляют автоколебательные системы.

Рис. 7. Перемешивание цветного пластилина в шарике после последовательных итераций отображения «Подкова Смейла», т. е., сплющивания и складывания пополам.

Детерминированный хаос — абстрактное математическое понятие, обозначающее детерминированный процесс в детерминированной нелинейной системе, обусловленный свойством данной системы проявлять неустойчивость, чувствительную зависимость динамики системы от малых возмущений.

Замечание. Следует различать детерминированный хаос в диссипативных системах (например, возбуждаемый маятник с трением) и в консервативных системах (например, движение планет, подчиняющееся гамильтоновым уравнениям).

Синонимом детерминированного хаоса является **динамический хаос** — явление в теории динамических систем, при котором поведение нелинейной системы выглядит случайным, несмотря на то, что оно определяется детерминистическими законами. Оба термина полностью равнозначны и используются для указания на существенное отличие хаоса как предмета научного изучения в **синергетике** от хаоса в быденном смысле. Обратным к динамическому хаосу является динамическое равновесие и явления гомеостаза.

Важным обстоятельством является тот факт, что в диссипативных системах хаотическая динамика развивается в рамках определённой структуры. Эту структуру трудно изучать обычными методами изучения динамики, например, откладывая зависимость отклика от времени или получая частотный спектр. Порядок следует искать в фазовом пространстве (по осям которого отложены координата и скорость). Попутно можно обнаружить, что хаотические движения обладают **фрактальной структурой**.

Детерминированный хаос характеризуется наличием периодического процесса, траектория которого воспроизводится, т.е. после повторения начального состояния вновь воспроизводится одна и та же траектория, независимо от её сложности. Это позволяет по параметрам одного из периодов повторения траектории прогнозировать будущее. Однако при этом необходимо учитывать свойства равновесных и неравновесных систем. Неравновесные открытые системы допускают новые структурные состояния. Диссипативные системы независимо от вида устойчивости вызывают уменьшение фазового объема во времени до нуля. Так что диссипативная система может переходить в упорядоченное состояние в результате неустойчивости предыдущего неупорядоченного состояния. Первоначально устойчивая диссипативная структура в процессе своей

эволюции достигает критического состояния, отвечающего порогу устойчивости структуры, начинает осциллировать, а возникающие в ней флуктуации приводят к самоорганизации новой, более устойчивой структуры на данном иерархическом уровне эволюции. При этом важным является тот факт, что как и в биологических системах, переходы устойчивость — неустойчивость — устойчивость контролируются кумулятивной обратной связью. Она отличается от регулируемой извне обратной связью тем, что позволяет самоорганизовывать такую внутреннюю структуру, которая повышает степень ее организации. Таким образом, кумулятивная обратная связь за счет накопленной внутренней энергии позволяет системе осуществлять не просто обратное взаимодействие, учитывающее полученную информацию о предыдущем критическом состоянии, но и обеспечивать сохранение или повышение организованности структур.

Примерами хаотических динамических систем могут являться подкова Смейла и преобразование пекаря.

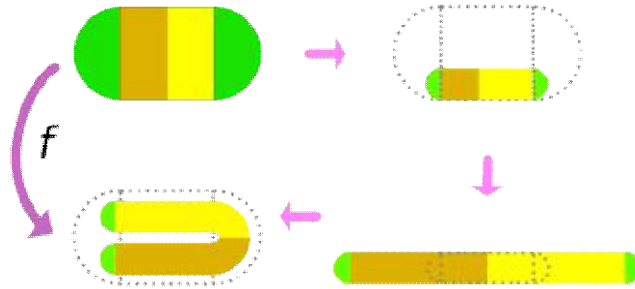


Рис. 8 Эволюция подковы Смейла. Предложенный Стивом Смейлом пример динамической системы, имеющей бесконечное число периодических точек (и хаотическую динамику), причём это свойство не разрушается при малых возмущениях системы.

Согласно алгоритму "подкова Смейла", единичный квадрат сжимается по одному направлению (по горизонтали) и растягивается по другому (по вертикали), причём площадь при этом уменьшается. Затем получившаяся полоска изгибается в форме подковы и вкладывается обратно в исходный квадрат. Эта процедура повторяется много раз. В пределе образуется множество с нулевой площадью, которое имеет в поперечном сечении *канторову структуру* - частный случай фрактальной геометрии (см. курс лекций И.Н. Бекмана "Фракталы"). Вид аттрактора Смейла мы рассмотрим далее в этой лекции.

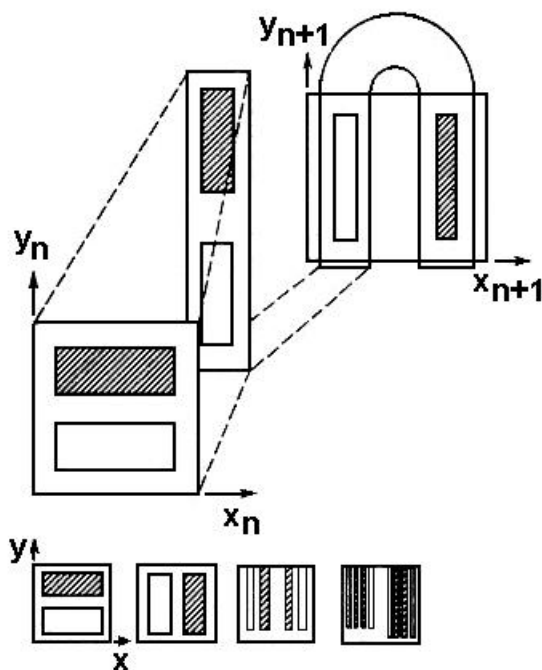


Рис. 9. Отображение подкова Смейла: вытягивание, сжатие и складывание после большого числа итераций отображения приводят к фрактальной структуре.

Отображение пекаря — нелинейное отображение единичного квадрата на себя, которое демонстрирует хаотическое поведение. Название «отображение пекаря» происходит из-за его сходства с замешиванием теста.

Так как отображение состоит из растяжения вдоль оси x и сжатия вдоль y , то близкие траектории экспоненциально расходятся в горизонтальном направлении и сближаются в вертикальном. Из случайной символической последовательности строится хаотическая траектория, которая проходит сколь угодно

близко к каждой точке квадрата (эргодичность). Под действием отображения любая выбранная область превращается в совокупность узких горизонтальных полос, которая через некоторое число итераций равномерно покрывает единичный квадрат (перемешивание). Преобразование обратимо, при итерациях в обратном направлении любая область будет разбиваться на узкие вертикальные полосы и также перемешивается по всему квадрату.

Ещё примером детерминированного хаоса является бильярд Адамара, т.е. бильярд, в котором вместо плоского стола используется закрученная поверхность отрицательной кривизны. Вычисление траектории движения шара по бильярдному столу Адамара «абсолютно непригодно», потому что маленькая неопределенность, непременно присутствующая в начальных условиях, приводит к большой неопределенности для предсказанной траектории, если мы подождём достаточно долго, что делает предсказание бесполезным.

Системы детерминированного хаоса позволяют по другому относиться к использованию статистических подходов в повышении надёжности эксперимента. Согласно традиционной матстатистике, чем больше мы проведём параллельных экспериментов, тем надежнее будут установлены изучаемые зависимости. К детерминированным системам это абсолютно не

применимо - здесь имеет место эффект принципиальной невоспроизводимости эксперимента. Мы можем ставить один и тот же эксперимент, точнейшим образом воспроизводить начальные условия, и получать повторяемые результаты, но в один прекрасный момент (предсказать его мы не можем) наблюдения начнут давать совершенно несхожие результаты. Это связано с явлением разбегания орбит, которое иллюстрируется только что рассмотренными тремя примерами.

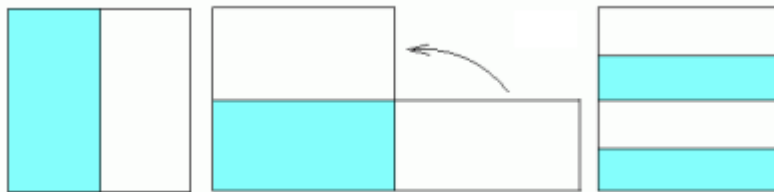


Рис. 10. Отображение пекаря. Преобразование состоит из однородного сжатия квадрата в 2 раза в вертикальном направлении и растяжения в горизонтальном. Далее правую половину следует отрезать и положить на левую. На рисунке показано действие двух первых итераций.

2.3 Открытие детерминированного хаоса

Рассмотрение детерминированного хаоса начнём с теории стохастического поведения динамических диссипативных систем. Нас будет интересовать случайное поведение системы, которая полностью детерминирована, т.е. её эволюцию во времени можно точно предсказать (и это подтверждается в широком интервале изменения параметров), но которая при некоторых значениях начальных условий (причём очень незначительных) начинает флуктуировать случайным образом и её поведение становится непредсказуемым, хаотичным.

Как показывает повседневный опыт, для многих физических систем малые изменения начальных условий приводят к малым изменениям результата. Так, например, путь автомобиля мало изменится, если руль лишь слегка поворачивать. Но есть ситуации, для которых справедливо противоположное. Сторона, на которую упадет монета, поставленная на ребро, зависит от слабого прикосновения. Последовательность «орлов» и «решек» при подбрасывании монеты проявляет нерегулярное, или хаотическое, поведение во времени, так как крайне малые изменения начальных условий могут привести к совершенно различным результатам.

Ещё сравнительно недавно полагали, что случайное поведение системы - это исключение, а практически все системы — детерминированы. Однако сейчас понятно, что высокая чувствительность к начальным условиям, приводящая к хаотическому поведению во времени, — типичное свойство многих систем. Такое поведение, например, обнаружено в периодически стимулируемых клетках сердца, в электронных цепях, при возникновении турбулентности в жидкостях и газах, в химических реакциях, в лазерах и т. д. С точки зрения математики во всех нелинейных динамических системах с числом степеней свободы больше двух (особенно во многих биологических, метеорологических и экономических моделях) можно обнаружить хаос и, следовательно, на достаточно больших временах их поведение становится непредсказуемым.

Для физической системы, поведение которой по времени *детерминировано* существует правило в виде дифференциальных уравнений, определяющее её будущее исходя из заданных начальных условий. Естественно предположить, что детерминированное движение достаточно регулярно и далеко от хаотичности, поскольку последовательные состояния непрерывно развиваются одно из другого. Это означает, что в классической механике все уравнения должны быть интегрируемы. Но уже в 1892 г. А. Пуанкаре знал, что в некоторых механических системах, эволюция которых во времени определяется уравнениями Гамильтона, возможно непредсказуемое хаотическое поведение. Примером является неинтегрируемая задача трёх тел, которая в определённых условиях приводит к полностью хаотическим траекториям.

Частным случаем задачи трёх тел является движение пробной частицы в гравитационном поле двух неподвижных точечных масс. Даже если движение происходит в одной плоскости, траектория частицы выглядит чрезвычайно сложной и запутанной. Она, то обвивается вокруг одной из масс, то неожиданно перескакивает к другой — рис. 7. Первоначально близкие траектории очень быстро расходятся.

Впоследствии было показано, что неинтегрируемых систем в механике много.

Через 60 лет после Пуанкаре Колмогоров, 1954; Арнольд, 1963 и Мозер, 1967 доказали, что в классической механике движение в фазовом пространстве не является ни полностью регулярным, ни полностью нерегулярным, а тип траектории зависит от выбора начальных условий (сейчас это утверждение носит название теоремы КАМ). Таким образом, устойчивое регулярное движение в классической механике — исключение в противоположность утверждениям многих учебников.

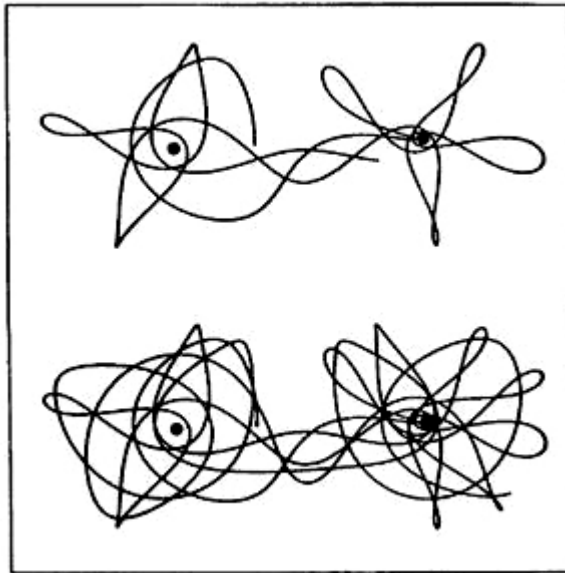


Рис. 11. Движение пробной частицы вблизи двух одинаковых масс. Вверху показана начальная часть траектории, а внизу её продолжение.

В 1961 американский метеоролог Эдвард Лоренц при моделировании неравномерно прогреваемого атмосферного воздуха обнаружил, что даже простая система из трёх связанных нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка может привести к совершенно хаотическим траекториям (это — первый пример *детерминированного хаоса* в диссипативных системах).

Э.Лоренц вычислял значения решения в течение длительного времени, а затем остановил счет. Его заинтересовала некоторая особенность решения, которая возникала в середине интервала счета, и поэтому он повторил вычисления с этого момента. Результаты

повторного счета, очевидно, совпали бы с результатами первоначального счета, если бы начальные значения для повторного счета в точности были равны полученным ранее значениям для этого момента времени. Лоренц слегка изменил эти значения, уменьшив число верных десятичных знаков. Ошибки, введенные таким образом, были крайне невелики. Вновь сосчитанное решение некоторое время хорошо согласовывалось со старым. Однако, по мере счёта расхождение возрастало, и новое решение всё меньше напоминало старое. То, что наблюдал Лоренц, теперь называется существенной зависимостью от начальных условий — основной чертой, присущей хаотической динамике. Существенную зависимость иногда называют эффектом бабочки. Такое название относится к невозможности делать долгосрочные прогнозы погоды. Сам Лоренц разъяснил это понятие в статье "Предсказуемость: может ли взмах крылышек бабочки в Бразилии привести к образованию торнадо в Техасе?". Может!

Далее под детерминированным хаосом мы будем подразумевать нерегулярное, или хаотическое, движение, порожденное нелинейными системами уравнений, для которых динамические законы однозначно определяют эволюцию во времени состояния системы при известной предыстории.

Детерминированный хаос = нелинейная система уравнений + неустойчивость

От регулярного движения детерминированный хаос отличается сложными, неповторяющимися траекториями и непредсказуемостью поведения системы при больших временах (зависимость от начальных условий). От случайного процесса детерминированный хаос отличается тем, что в нём нерегулярность происходит из самой системы, а не от внешнего фактора (шум, флуктуации).

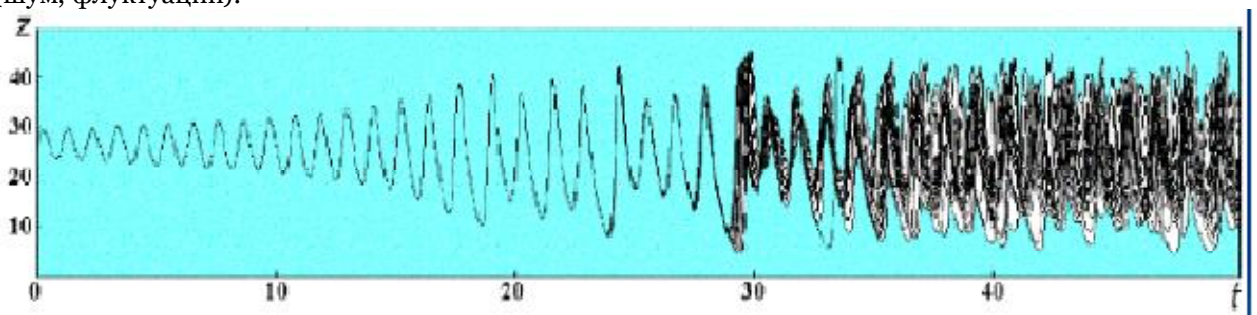


Рис. 12. Возникновение хаоса при больших временах.

Примерами нелинейных систем, в которых проявляется детерминированный хаос, являются: маятник с возбуждением, жидкости вблизи порога возникновения турбулентности, лазеры, приборы нелинейной оптики, переход Джозефсона (*Эффект Джозефсона — явление протекания сверхпроводящего тока через тонкий слой диэлектрика, разделяющий два сверхпроводника*) химические реакции, классические системы, включающие много тел (задача трёх тел), ускорители частиц, взаимодействующие нелинейные волны в плазме, биологические модели динамики популяций, стимулированные клетки сердца и др.

Как известно, линейные дифференциальные или разностные уравнения могут быть решены преобразованием Фурье и не приводят к хаосу. А нелинейные могут приводить, но важно

понимать, что нелинейность — необходимое, но не достаточное условие для возникновения хаотического движения.

Наблюдаемое во времени хаотическое поведение возникает не из-за внешних источников шума, не из-за бесконечного числа степеней свободы и не из-за неопределенности, связанной с квантовой механикой (рассматриваемые системы чисто классические). Настоящая первопричина нерегулярности определяется свойством нелинейных систем экспоненциально быстро разводить первоначально близкие траектории в ограниченной области фазового пространства (например, трёхмерного в системе Лоренца). Невозможно предсказать длительное поведение таких систем, поскольку начальные условия можно задать лишь с конечной точностью, а ошибки экспоненциально нарастают. При решении такой нелинейной системы уравнений на компьютере, результат на всё более дальних временах зависит от всё большего количества цифр в (иррациональных) числах, представляющих начальные условия. Так как цифры в иррациональных числах распределены нерегулярно, траектория становится хаотической.

Здесь возникает несколько фундаментальных вопросов:

— Можно ли предсказать (например, по виду соответствующих дифференциальных уравнений), реализуется ли в системе детерминированный хаос?

— Можно ли определить понятие хаотического движения более строго с точки зрения математики и разработать для него количественные характеристики?

— Каково воздействие этих результатов на различные области физики? Означает ли существование детерминированного хаоса конец долговременной предсказуемости в физике для нелинейных систем или по хаотическому сигналу ещё можно что-то узнать?

2.4 Элементы теории динамических систем

Перейдём теперь к изложению теоретических основ описания динамических систем. Однако, сначала напомним о понятиях, на которых базируется используемый в этой области математический аппарат.

Фазовое пространство — пространство, на котором представлено множество всех состояний системы, так, что каждому возможному состоянию системы соответствует точка фазового пространства.

Фазовое пространство = пространство значений параметров системы.

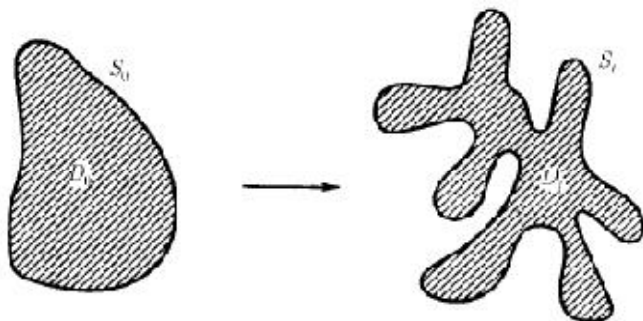
Траектория = набор точек в фазовом пространстве, последовательно посещаемых системой.

Особенность фазового пространства заключается в том, что состояние сколь угодно сложной системы представляется в нём одной единственной точкой, а эволюция этой системы — перемещением этой точки. При рассмотрении нескольких одинаковых систем, задаётся несколько точек в фазовом пространстве. Совокупность таких систем называют статистическим ансамблем. По теореме Лиувилля, замкнутая кривая (или поверхность), состоящая из точек фазового пространства гамильтоновой эволюционирует так, что площадь (или объём) заключённого в ней фазового пространства сохраняется во времени.

Теорема Лиувилля: функция распределения гамильтоновой системы постоянна вдоль любой траектории в фазовом пространстве. Теорема утверждает сохранение во времени фазового объёма, или плотности вероятности в фазовом пространстве.

Гамильтонова система — частный случай динамической системы, описывающей физические процессы без диссипации. В ней силы не зависят от скорости.

Динамическая система — система, обладающая состоянием. Она описывает



динамику процесса перехода системы из одного состояния в другое. Фазовое пространство системы — совокупность всех допустимых состояний динамической системы. Динамическая система характеризуется своим начальным состоянием и законом, по которому система переходит из начального состояния в другое.

Рис. 13. Сохранение фазового объёма при эволюции гамильтоновой

системы.

Динамическая система — система, моделью которой является система обыкновенных дифференциальных уравнений. **Устойчивая динамическая система** — динамическая система, состояние которой полностью определяется начальными условиями и внешними воздействиями в процессе развития.

В консервативной системе элемент в фазовом пространстве только изменяет форму, но сохраняет объём (выполняется теорема Лиувилля), что предопределяет характер эволюции и тип хаотичности, возникающий в консервативных системах. Консервативные системы характеризуются неизменным во времени запасом энергии. В механике их называют гамильтоновыми. Механические колебательные системы в отсутствие трения относятся к консервативным системам. В консервативных системах хаотические орбиты стремятся однородно заполнить все части некоторого подпространства в фазовом пространстве, т.е. они характеризуются однородной плотностью вероятности в ограниченных областях фазового пространства.

Примером простой консервативной системой с одной степенью свободы является маятник. Если на колебания маятника трение не оказывает заметного влияния, то гамильтониан маятника длины l и массы m равен сумме потенциальной $\Pi = -mgl \cos \varphi$ и кинетической $K = p^2/2ml^2$ энергий:

$$H = p^2/2ml^2 - mgl \cos \varphi, \quad (2)$$

где φ — угол отклонения от вертикали а g — ускорение свободного падения.

Уравнения движения маятника имеют вид:

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \omega_0^2 \sin \varphi = 0, \quad (3)$$

где $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$ — частота колебаний.

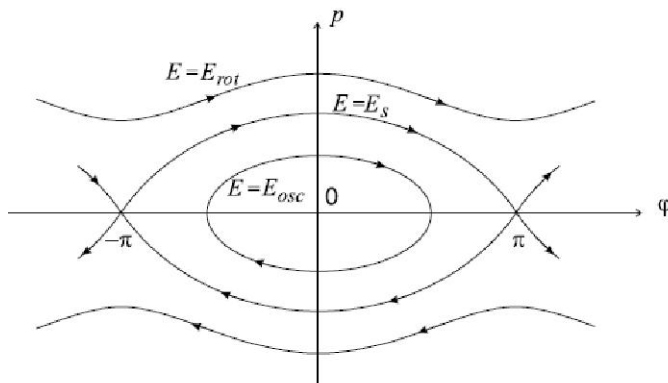


Рис. 14 . Фазовый портрет маятника с гамильтонианом (2.3).

Когда полная энергия $H = E$ маятника превышает наибольшее значение потенциальной энергии, $E = E_{rot} > mgl$, импульс p всегда будет отличен от нуля, что приводит к неограниченному росту угла φ . Это означает, что маятник будет вращаться. На фазовой плоскости (рис. 14) такое поведение изображается траекториями E_{rot} , отвечающими движению фазовой

точки слева на право для $p > 0$ и справа на лево для $p < 0$. Колебания маятника соответствует энергия $E = E_{osc} < mgl$. Если же $E \approx E_s = mgl$, то период колебаний стремится к бесконечности и движение происходит по сепаратрисе — линии, разделяющей два качественно различных типа движения: колебания ($E = E_{osc}$) и вращение ($E = E_{rot}$). В окрестности точек с координатами $(p, \varphi) = (0, 2\pi k)$, $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, семейство фазовых кривых имеет вид эллипсов. Поэтому такие точки называются эллиптическими точками системы. Семейство траекторий вблизи точек $(p, \varphi) = (0, \pi + 2\pi k)$, $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, имеет вид гипербол, и такие точки называются гиперболическими. Эллиптические точки являются устойчивыми и соответствуют нижнему положению равновесия маятника, а гиперболические точки, соответствующие верхнему положению равновесия маятника, являются неустойчивыми. Фазовая кривая, начавшаяся в окрестности гиперболической точки, удаляется от неё, в то время как траектория вблизи эллиптической точки всегда остаётся в её окрестности.

Замечание. Маятник в случае малых отклонений описывается линейными уравнениями: частота колебаний не зависит от амплитуды. Маятник в случае больших отклонений относится к нелинейной системе: частота колебаний зависит от амплитуды.

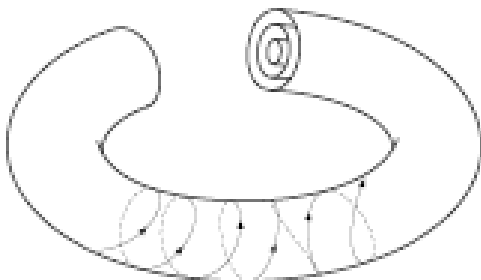


Рис. 15. Фазовый портрет интегрируемой системы с двумя степенями свободы.

Для систем с двумя степенями свободы фазовое пространство четырёхмерно. Примером является система двух гармонических осцилляторов единичной массы (рис. 15). В случае полностью интегрируемых систем с n степенями свободы фазовое пространство $2n$ -мерно и в переменных действие-угол имеет структуру множества n -мерных торов. Любая возможная траектория располагается на одном из них. При этом некоторые траектории могут

оказаться замкнутыми, другие же будут всюду плотно покрывать поверхность соответствующего тора.

Диссипативная система - открытая динамическая система, в которой наблюдается прирост энтропии.

В диссипативной системе из-за диссипации энергии объём элемента фазового пространства сокращается с течением времени (теорема Луивилля не соблюдается). Поэтому в фазовом пространстве диссипативных систем появляются притягивающие множества, которые не существуют в консервативных системах - аттракторы (*attract* - притягивать).

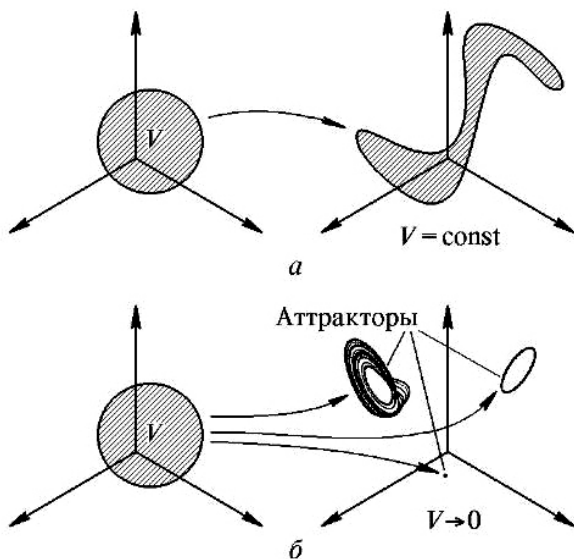


Рис. 16. К определению консервативных (а) и диссипативных (б) динамических систем.

Аттрактор - состояние динамической системы, к которому она стремится в процессе своего движения (развития). В фазовом пространстве аттрактор устойчивой динамической системы изображается точкой (в случае аperiodических процессов) или предельным циклом (в случае периодических процессов).

Странный аттрактор - аттрактор, которому в фазовом пространстве соответствует область, притягивающая к себе из окрестных областей все фазовые траектории.

Эти траектории имеют сложную и запутанную структуру и представляют собой незамкнутые кривые.

Для диссипативных систем характерно, что с течением времени облако изображающих точек "съезжается" и концентрируется на одном или нескольких аттракторах - подмножествах фазового пространства, обладающих обычно нулевым фазовым объёмом (рис. 16б). С точки зрения динамики во времени это означает, что режим, возникающий в системе, предоставленной себе в течение длительного времени, становится независимым от начального состояния.

Хаотические орбиты в системах с потерями обнаруживают фрактальную структуру фазовых портретов, в то время как в бездиссипативных системах такая структура отсутствует. Примером является механическая колебательная система в присутствии трения, в которой механическая энергия не сохраняется, а постепенно рассеивается (диссипирует) и переходит в тепло, т.е. в энергию микроскопического движения молекул, составляющих систему и её окружение.

Понятие фазового пространства широко используется в разных областях физики. Интерпретация состояния движущегося объекта как точки в фазовом пространстве разрешает парадокс Зенона (Парадокс состоит в том, что если мы описываем состояние объекта его положением в конфигурационном пространстве, то объект не может двигаться.) Фазовое пространство состояний квантового осциллятора позволяет описать квантовый шум усилителя, а также построить единый формализм для классической и квантовой механики. смысл как в классической, так и в квантовой механике.

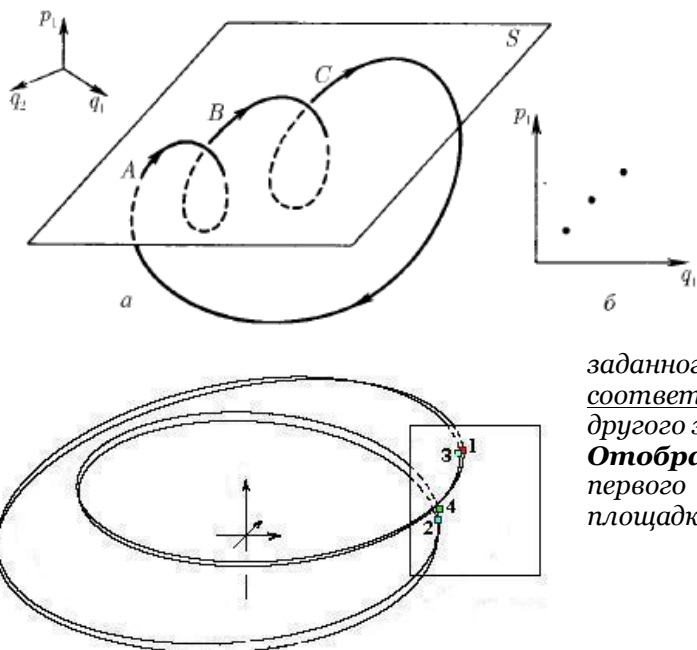


Рис. 17. Построение отображения Пуанкаре в фазовом пространстве автономной гамильтоновой системы с двумя степенями свободы.

В анализе динамических систем широко используется отображение Пуанкаре.

Отображение - закон, по которому каждому элементу некоторого заданного множества X ставится в соответствие вполне определенный элемент другого заданного множества Y .

Отображение Пуанкаре (отображение первого возвращения) — проекция некоторой площадки в фазовом пространстве на себя (или

на другую площадку) вдоль траекторий (фазовых кривых) системы.

Рис. 18. Сечение Пуанкаре - составление разностного уравнения (отображения) для динамической модели с непрерывно меняющимся временем.

А. Пуанкаре предложил процедуру, которая сопоставляет динамике в рамках дифференциальных уравнений некоторое отображение. Идея состоит в следующем: в фазовом пространстве строится некоторая поверхность, и изучается поведение точек пересечения фазовой траектории и секущей. На рис. 18 показана иллюстрация этого метода – сечение Пуанкаре четырехоборотного предельного цикла. Можно видеть, что в таком сечении изображающая точка будет последовательно занимать положения, отмеченные цифрами 1, 2, 3 и 4. Таким образом, в терминах отображений можно сказать, что реализуется цикл периода 4. Понятно, что те или иные перестройки предельного цикла будут приводить и к перестройкам в сечении Пуанкаре. Последнее изучать гораздо проще, что и определяет важность этого метода. При анализе конкретных систем сечение Пуанкаре строится при помощи компьютера.

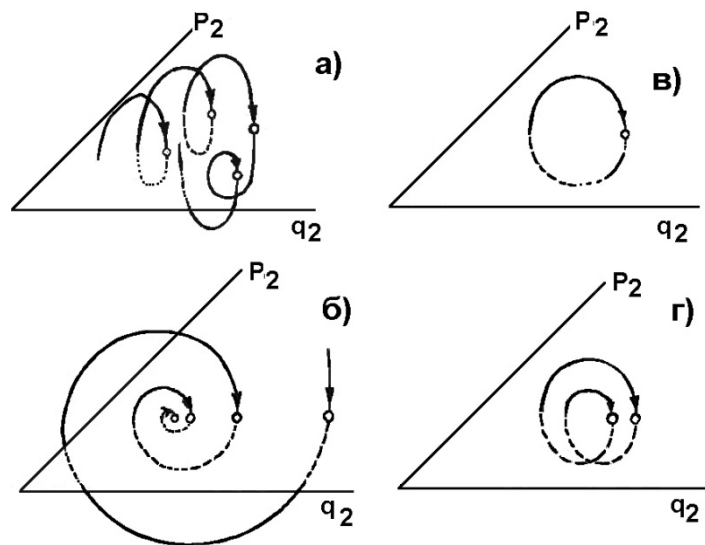


Рис. 19. Качественно разные траектории отличаются сечениями Пуанкаре: а - хаотическое движение; б - движение к неподвижной точке; в - цикл; г - цикл удвоенного периода.

Метод сечений Пуанкаре является эффективным, но не всегда надёжным, методом исследования периодического движения с понижением порядка системы. На рис. представлены четыре типа сечения Пуанкаре.

Применение сечения Пуанкаре проиллюстрируем на примере системы уравнений Хенона-Хейлиса (1964), описывающей движение частицы массой $m=1$ в двумерном потенциале:

$$U(x, y) = \frac{x^2 + y^2}{2} + x^2 y - \frac{1}{3} y^3 \quad (4)$$

По сути это два одинаковых гармонических осциллятора с нелинейным взаимодействием между ними. Если полная энергия этой механической системы $0 < E < 1/6$, то движение финитно и происходит внутри треугольной области (потенциальной ямы) на плоскости x, y , показанной на рис. 20.

При энергиях E , близких к нулю система совершает обычные гармонические колебания, однако если величина E не очень мала, то большая часть траекторий этой системы (с двумя степенями свободы) блуждает по изоэнергетической гиперповерхности в 4-х мерном фазовом пространстве (x, y, p_x, p_y) крайне нерегулярным образом. Так, если взять только те моменты времени, когда траектория пересекает плоскость $x=0$, то значение координаты y и импульса p_y изображены в эти моменты точками на рис. 20 (сечение Пуанкаре). Причем для энергии $E=1/10$ показано несколько траекторий (с разными начальными условиями), а для $E=1/8$ всего одна – хаотическая.

Динамических системы, которые описываются обыкновенными (линейными) дифференциальными уравнениями, имеют четыре типа решений: состояние равновесия, периодическое движение, квазипериодическое движение и хаотическое. Динамические системы, моделируемые конечным числом обыкновенных дифференциальных уравнений, называют сосредоточенными или точечными системами. Они описываются с помощью конечномерного фазового пространства и характеризуются конечным числом степеней свободы. Одна и та же система в различных условиях может рассматриваться либо как сосредоточенная, либо как распределенная. Математические модели распределенных систем – это дифференциальные уравнения в частных производных, интегральные уравнения или обыкновенные уравнения с запаздывающим аргументом. Число степеней свободы распределенной системы бесконечно, и требуется бесконечное число данных для определения её состояния.

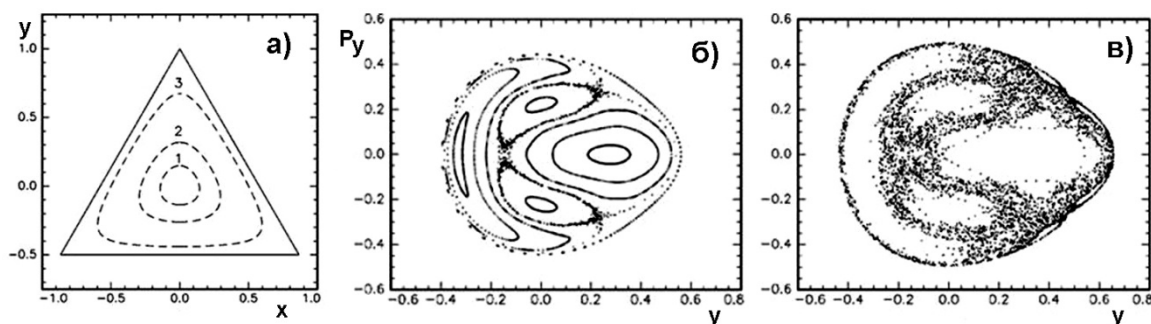


Рис. 20. Модель Хенона-Хейлеса: а - область фазового движения (пунктирные линии представляют собой эквипотенциальные кривые $U=\text{const}$, 1 - $U=0,01$, 2 - $U=0,04$, 3 - $U=0,125$); сечение Пуанкаре (y, P_y) при энергии частицы $E=1/10$ (б) и $E=1/8$ (в).

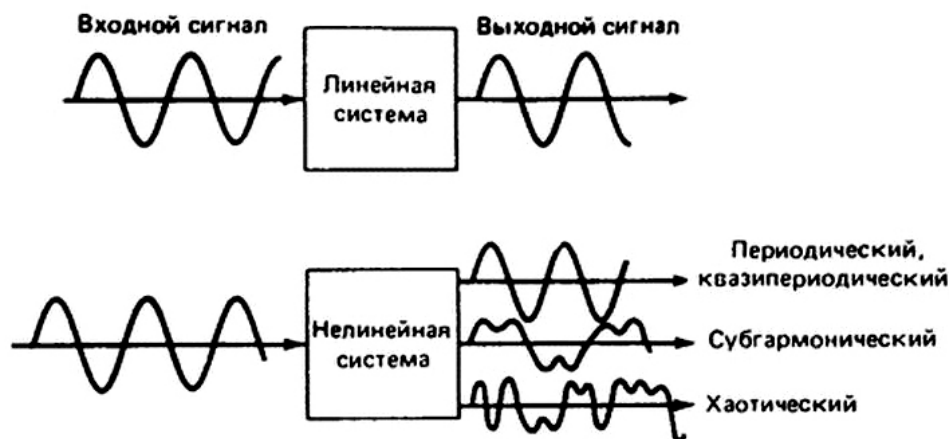


Рис. 21. Схема возможных преобразований сигнала в линейных и нелинейных системах.

В линейной системе оператор эволюции линеен, т.е. $A(x+y)=Ax+Ay$, $A(\lambda x)=\lambda Ax$. В такой системе не может быть хаотических колебаний. В ней периодические внешние воздействия вызывают после затухания переходных процессов периодический отклик того же периода (рис. 21).

Маятник с трением

Как известно, существуют три классических типа движения: равновесие, периодическое движение (предельный цикл) и квазипериодическое движение. Эти состояния называются аттракторами, поскольку в присутствии какого-либо затухания переходные отклонения подавляются и система "притягивается" к одному из трёх перечисленных состояний. Существует, однако, класс движений (нелинейные колебания), который не сводится ни к одному из классических аттракторов. Здесь движения хаотичны в том смысле, что, если присутствует малая неопределённость начальных условий, то они непредсказуемы (странный аттрактор).

Классическим аттракторам соответствуют классические геометрические объекты в фазовом пространстве: равновесному состоянию - точка, периодическому движению или предельному циклу - замкнутая кривая, а квазипериодическому движению соответствует поверхность в трёхмерном фазовом пространстве. Странный аттрактор связан с геометрическим объектом - фрактальным множеством. В трёхмерном фазовом пространстве фрактальное множество странного аттрактора выглядит как набор бесконечного числа слоев или параллельных плоскостей, причём расстояние между некоторыми из них приближается к бесконечно малому.

Примером неинтегрируемой системы может служить двойной плоский маятник с точечными массами m_1 и m_2 , (рис. 22) у которого две степени свободы — углы φ_1 и φ_2 . Если отклонение от положения равновесия мало, то система совершает регулярные гармонические колебания. Однако при увеличении полной энергии наступает такой момент, когда колебания становятся хаотическими — маятники начинают прокручиваться и два близких начальных условия приводят в конце концов к совершенно различной динамике этой нелинейной системы с двумя степенями свободы.

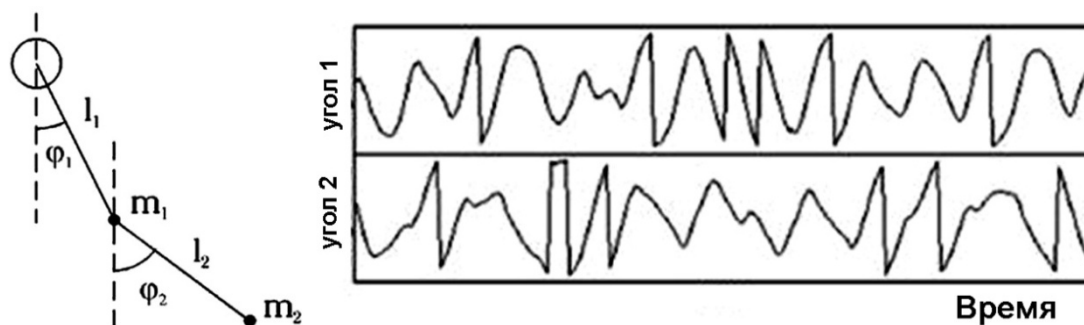


Рис. 22. Двойной плоский маятник и его хаотические колебания.

Хаотическая динамическая система - динамическая система, процессы в которой описываются странным аттрактором. В отличие от устойчивой динамической системы определить состояние системы по заданным значениям времени и начальных условий невозможно.

Бифуркация - раздвоение, разделение, разветвление чего-либо. Состояние процесса в динамической системе, при котором резко возрастают флуктуации и выход из которого возможен по двум существенно различным трудно предсказуемым направлениям — хаотическому или упорядоченному.

Важной характерной особенностью всех систем, в которых наблюдается детерминированный хаос, является то, что они описываются нелинейными дифференциальными уравнениями или системами уравнений. К таким уравнениям неприменим принцип суперпозиции, справедливый для линейных систем, согласно которому сумма решений есть тоже решение. Нелинейная система управляется нелинейным оператором эволюции: $A(\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2) \neq \alpha_1 A x_1 + \alpha_2 A x_2$. Примером является функция $\sin(x)$. Ситуация осложняется еще и тем, что у нелинейных уравнений часто не одно, а несколько решений. Среди них могут быть как хаотические, так и регулярные, периодические решения. Какое из них осуществляется на практике, зависит от начальных условий.

Простейшим видом динамического хаоса является хаотическая динамика в нелинейных системах с *дискретным* временем (регулярная динамика рассматривается при этом как этап, предшествующий хаосу). Математический аппарат здесь прост, фактически он сводится к теории разностных уравнений. Понимание хаоса в системах с *непрерывным* временем сложнее, требуется глубокое знание теории дифференциальных уравнений.

Важно понимать, что для возникновения хаоса в случае систем с *непрерывным* временем их размерность (порядок N нелинейного дифференциального уравнения, описывающего данную систему) должна быть не ниже 3-х. Такие системы (3D-динамические системы) представляются *потоками* траекторий в фазовом пространстве, размерность которого 3 (или выше, в соответствии с порядком дифференциального уравнения). Однако в нелинейных динамических системах с *дискретным* временем хаотические движения могут возникать уже в случае систем 1-го порядка (1D-дискретные динамические системы). Эти движения представляют *каскады* дискретных отображений и описываются нелинейными разностными уравнениями порядка 1 и выше.

Отметим, что существуют четыре критерия хаотичности движения: сигнал «выглядит случайным»; в спектре мощности наблюдается широкополосный шум на низких частотах; автокорреляционная функция быстро спадает; сечение Пуанкаре состоит из точек, заполняющих пространство.

Математические модели, содержащие 3 и более обыкновенных дифференциальных уравнений, способны демонстрировать хаотические режимы колебаний, которые на первый взгляд имеют вид случайных процессов. Переход в фазовое пространство позволяет получать наглядную информацию об особенностях сложной динамики соответствующих систем, и прежде всего о геометрии предельных множеств фазовых траекторий, которые соответствуют установившимся режимам.

Важную роль в анализе хаотических систем сыграл странный аттрактор Э. Лоренца. Лоренц показал, что разогрев воздуха со стороны Земли и охлаждение его с противоположной приводит к конвекционным потокам, которые приближенно описываются системой трёх обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, не имеющих точного аналитического решения:

$$dx/dt = s(y-x), \quad (5a)$$

$$dy/dt = x(r-z) - y, \quad (5б)$$

$$dz/dt = xy - bz, \quad (5в)$$

где $s = 10, r = 28, b = 8/3$.

Модель Лоренца представляет собой динамическую систему в трёхмерном фазовом пространстве.

Переменная X пропорциональна скорости конвективного потока (характеризует скорость вращения конвекционных валов), Y и Z — отвечают за распределение температуры соответственно по горизонтали и вертикали. Параметр r пропорционален числу Рэлея, а s и b — некоторые безразмерные константы, характеризующие систему. Решение этих уравнений — функции $X(t)$, $Y(t)$ и $Z(t)$ — определяют в параметрическом виде траекторию системы в трёхмерном "фазовом" пространстве X, Y, Z . Ввиду однозначности функций, стоящих в правых частях этих уравнений, траектория себя никогда не пересекает.

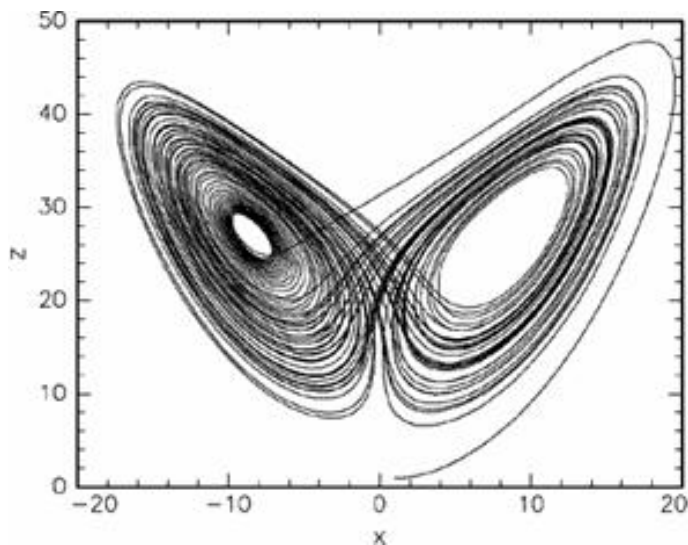


Рис. 23. Траектория, отвечающая хаотическому решению уравнений Лоренца, с параметрами, приведенными в тексте, и начальными условиями $X(0)=Y(0)=Z(0)=1$. Один эллипс отражает вращение атмосферы по часовой стрелке, другой — против неё.

Лоренц исследовал вид этих траекторий при разных начальных условиях при значениях параметров $r=28$, $s=10$ и $b=8/3$. Он обнаружил что при этом траектория хаотическим образом блуждает из полупространства $x>0$ в полупространство $x<0$, фланируя две почти плоских, перепутанных сложным образом спиралей. На рис. 23 показана

проекция этих спиралей на плоскость XZ для некоторого начального условия. Траектория сперва делает 1 оборот справа, затем 20 слева, затем опять 1 справа, затем 4 — слева и так далее. Похожее поведение было найдено и при других значениях параметров. Хаотичность решения означает, что если мы заранее выберем каким угодно способом цепочку переходов из одного полупространства в другое, то у системы Лоренца найдется решение, которое в точности эту цепочку воспроизведёт.

Причина непредсказуемости поведения этой и других подобных систем заключается в не в том, что не верна математическая теорема о существовании и единственности решения при заданных начальных условиях, а в необычайной чувствительности решения к этим начальным условиям. Близкие начальные условия со временем приводят к совершенно различному конечному состоянию системы. Причем часто различие нарастает со временем экспоненциально, то есть чрезвычайно быстро (см. рис. 24):

$$D(t) = D(0)e^{ht},$$

(6)

где инкремент неустойчивости h является функцией точки в фазовом пространстве.

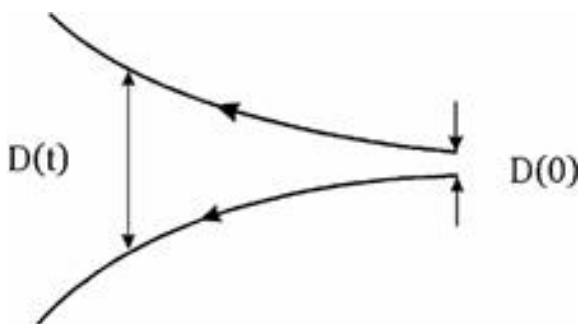


Рис. 24. Две первоначально близкие траектории в фазовом пространстве расходятся со временем в результате локальной неустойчивости.

Оказалось, что нечто похожее происходит и с системами, в которых наблюдается детерминированный хаос: они движутся таким образом, что все время находятся в неустойчивом

состоянии. Иными словами, сколь угодно малые возмущения начальных условий приводят с течением времени к сильному отклонению траектории от своего невозмущенного положения. Если фазовое пространство системы является конечным, то фазовые траектории не могут разойтись из-за неустойчивости более чем на характерный размер области движения, и начинается их запутывание. Предсказать поведение такой системы тогда оказывается практически невозможным.

Странный аттрактор — это некоторое «сложно устроенное» множество в фазовом пространстве, к которому притягиваются почти все траектории из его некоторой окрестности, а на самом множестве движение имеет экспоненциально неустойчивый характер. Такое сочетание глобального сжатия с локальной неустойчивостью приводит к тому, что аттрактор уже не может быть гладким как, например, тор; он определенным образом расслаивается и представляет собой в некотором сечении канторово множество (фрактально). Странный аттрактор играет определяющую роль в решении проблемы турбулентности.

Количественными критериями хаоса являются показатель Ляпунова и фрактальная размерность. При этом положительный показатель Ляпунова указывает на хаотическую динамику,

а фрактальная структура орбиты в фазовом пространстве указывает на присутствие странного аттрактора. Проверка с применением показателя Ляпунова может использоваться в как в диссипативных, так и бездиссипативных (консервативных) системах, а фрактальные размерности имеют смысл только в диссипативных системах.

Фрактал - структура, обладающая свойствами изломанности и самоподобия

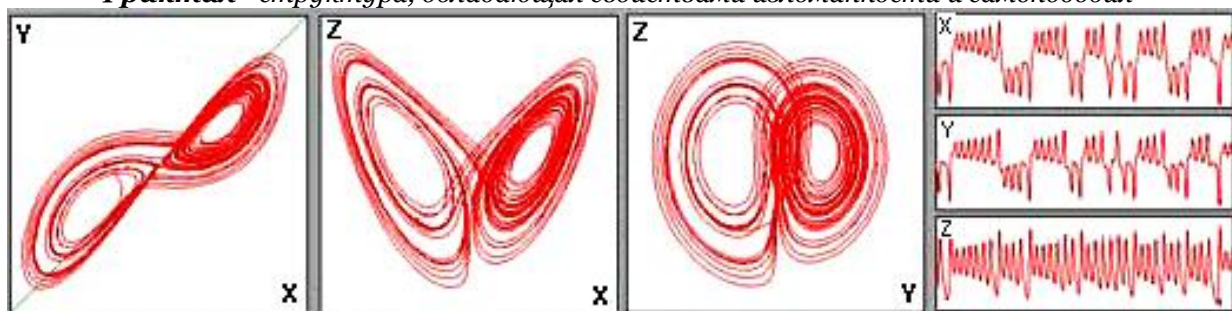


Рис. 25. Динамика хаотической системы (Лоренц): представлены временные реализации, проекции фазовых траекторий, сечение Пуанкаре.

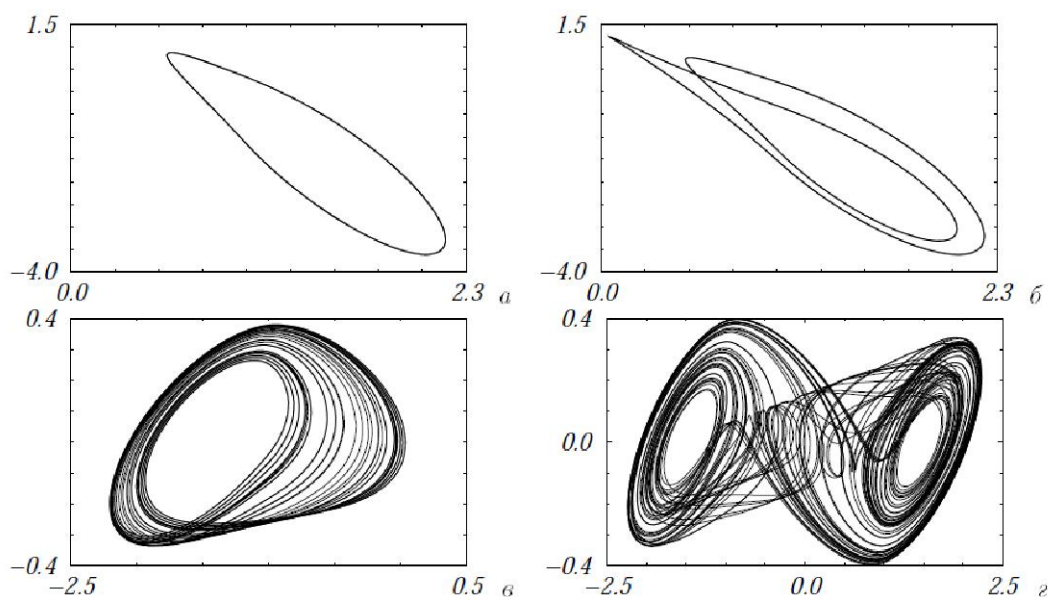


Рис. 26. Двумерные проекции периодической (а,б) и хаотической (в,г) динамик 3-мерной динамической системы.

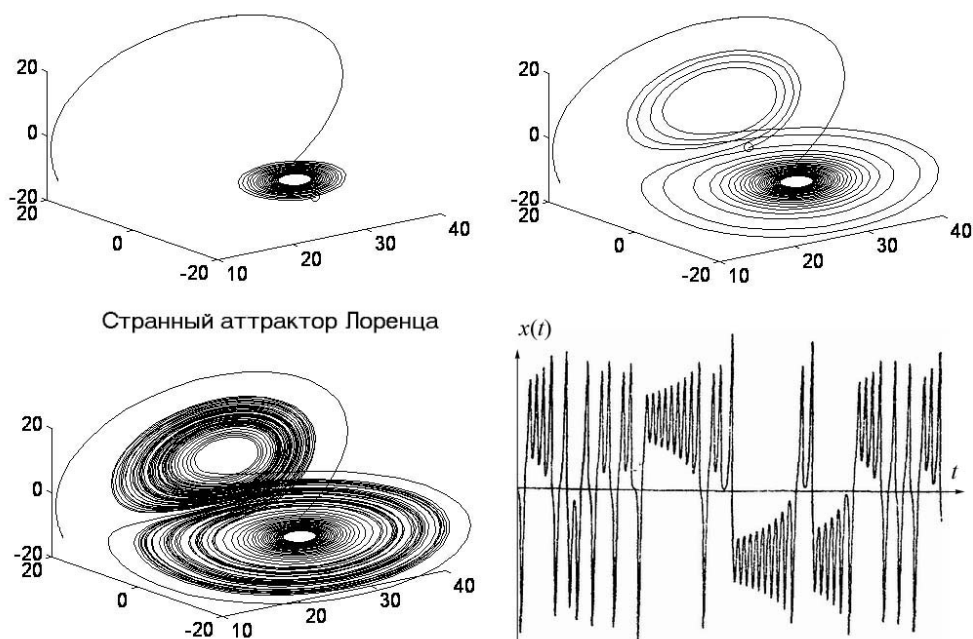


Рис. 27. Эволюция странного аттрактора Лоренца.

Хаос в динамике означает чувствительность динамической эволюции к изменениям начальных условий. Если представить себе набор начальных условий, заполняющий в фазовом пространстве сферу радиуса E , то траектории хаотического движения, начинающиеся в этой сфере, отобразят её на эллипсоид, большая полуось которого растёт как $d = E \cdot \exp(L \cdot t)$, где постоянная $L > 0$ - показатель Ляпунова. Для регулярных движений $L \leq 0$, но в хаотических режимах $L > 0$. Таким образом, знак L является критерием хаоса. Такое же «беспорядочное» перепрыгивание рекурсивной функции с одной орбиты на другую наблюдается на аттракторе Лоренца. Здесь «хаотичность» усугубляется ещё и тем, что конфигурация границ аттрактора Лоренца, его тонкая структура скрыта от наших глаз, поэтому все выглядит по меньшей мере «странно». Сначала вращение переднего фронта графического изображения функции происходит в одной плоскости, потом орбита этой пространственной функции неожиданно перепрыгивает в другую плоскость, сделав несколько оборотов, траектория снова переходит на первоначальную плоскость, и эти непрерывающиеся скачки воспринимаются как абсолютно случайные, но по своей сути они таковыми не являются.

На примере отображения "подкова", мы видели, что в системах с хаотической динамикой области фазового пространства вытягиваются, сжимаются, складываются и отображаются обратно на исходную область. При этом отображении в фазовом пространстве остаются лакуны. Это значит, что орбиты стремятся заполнить менее чем целое подпространство фазового пространства. Фрактальная размерность - мера степени заполнения орбитой определённого подпространства, и нецелая размерность - визитная карточка странного аттрактора.

Замечание. Если фракталы рассматривать не в статике, а в динамике (в эволюции во времени), то динамическим аналогом фрактала будет хаос (конкретный фрактал - мгновенный снимок хаотического процесса). Хаос описывает состояние крайней непредсказуемости, возникающей в динамической системе, в то время как фрактальность описывает крайнюю иррегулярность или изрезанность, присущую геометрической конфигурации.

Таким образом, свойства странного аттрактора связаны с чувствительной зависимостью от начальных условий (любые две первоначально близкие траектории на аттракторе в конце концов расходятся, причём расхождение траекторий (усредненное по коротким интервалам времени) возрастает со временем экспоненциально). Для него характерно обращение в нуль автокорреляционной функции, широкополосный спектр Фурье и внутренняя непредсказуемость системы. Малейшая ошибка или неточность в задании начального условия не позволяет определить, по какой траектории пойдет эволюция системы, и вынуждает ограничиться статистическим предсказанием долговременного будущего системы. Отсюда следует нетривиальный вывод о непредсказуемости поведения некоторых детерминированных потоков всего лишь с тремя степенями свободы!

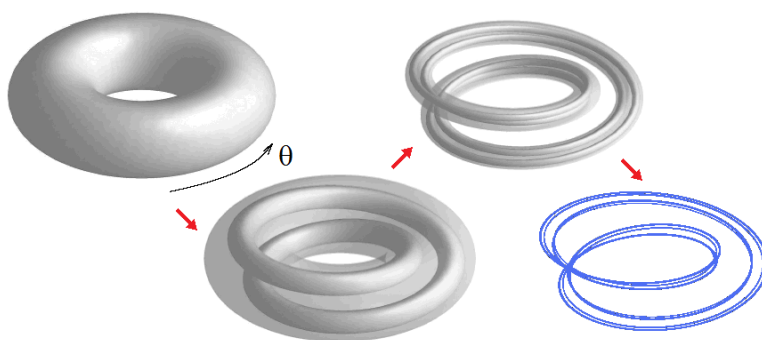


Рис. 28. Построения аттрактора соленоида Смейла – Вильямса.

Аттракторы в виде состояний равновесия, предельных циклов или 1-мерных торов называют простыми или регулярными, подчеркивая тем самым, что движения на них отвечают сложившимся представлениям об устойчивом по

Ляпунову детерминированном поведении динамической системы. Со странным (хаотическим) аттрактором связывается реализация нерегулярного (в смысле отсутствия периодичности) колебательного режима, который во многом сходен с нашими представлениями о стационарных случайных процессах. Термин случайный имеет вполне определенный смысл. Случайное движение непредсказуемо либо предсказуемо с определенной вероятностью. Другими словами, траектории случайного движения нельзя многократно и однозначно воспроизвести ни в численном, ни в физическом эксперименте. Примером служит классическое движение броуновской частицы. В случае странного аттрактора имеется строгая предсказуемость в смысле детерминированности закона эволюции. Решение уравнений (как и для регулярных аттракторов) подчиняется теореме единственности и однозначно воспроизводится при фиксированных начальных условиях. Поэтому для обозначения сложных "шумоподобных" автоколебаний, математическим образом которых служит странный аттрактор, используются термины типа динамическая стохастичность, детерминированный хаос и подобные. Важно отличать эти процессы от стохастических в классическом смысле, которые при описании требуют учета

флуктуаций в исходных динамических уравнениях либо непосредственно подчиняются уравнениям для плотности распределения вероятностей статистической теории.

Известно большое число аттракторов различного типа. Например, на базе нелинейной динамики типа подкова Смейла строится аттрактор Смейла – Вильямса путём отображения трехмерного пространства в себя: область в форме тора растягивают в длину, складывают вдвое и вкладывают исходный тор (рис. 28). При каждой следующей итерации количество «витков» удваивается. Поперечная структура соленоида Смейла – Вильямса имеет вид канторова множества (фрактальна).

Коротко остановимся теперь ещё на одном свойстве нелинейных систем - перемежаемости.

Под перемежаемостью понимают прерванное равновесие в нелинейных системах. Как известно, у системы есть два абсолютно разных режима функционирования:

- система может долго находиться в состоянии близком к покою, когда уровень активности близок к нулю или в состоянии небольших колебаний вблизи точки равновесия;

- относительный покой неожиданно и непредсказуемо сменяется вспышками высокой активности, которые могут также неожиданно затухать.

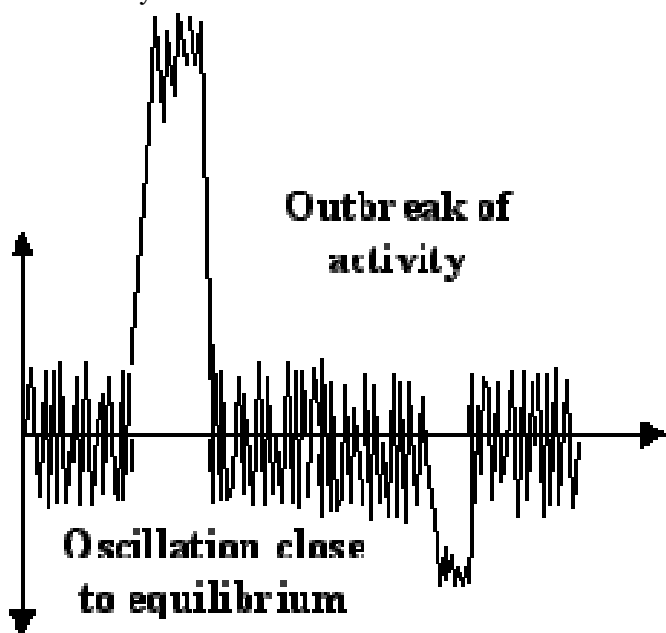


Рис. 29. Перемежаемость в последовательности сигналов.

Важно то, что эти вспышки активности генерируются самой системой, они практически никак не зависят от внешних воздействий. При этом длительность интервалов между вспышками, длительность самих вспышек, их амплитуда и т.п. совершенно случайны и не подчиняются никаким закономерностям.

Прерванное равновесие характерно для многих областей, таких как биологическая эволюция, социальные и рыночные процессы, гидродинамика, сейсмология и т.п. Некоторые кажущиеся необъяснимыми нарушения режимов

работы и даже аварии крупного химического, энергетического оборудования, компьютерных информационных сетей, резкие изменения моды и т.п. объясняются именно этим эффектом.

Переход от периодических колебаний к хаосу может происходить скачком, в результате

одной единственной бифуркации. Такой механизм возникновения хаоса называют «жестким». Он сопровождается явлением перемежаемости.

Перемежаемостью называют режим чередования во времени почти регулярных колебаний (ламинарная фаза) с интервалами хаотического поведения (турбулентная фаза), наблюдающийся сразу за порогом возникновения хаоса.

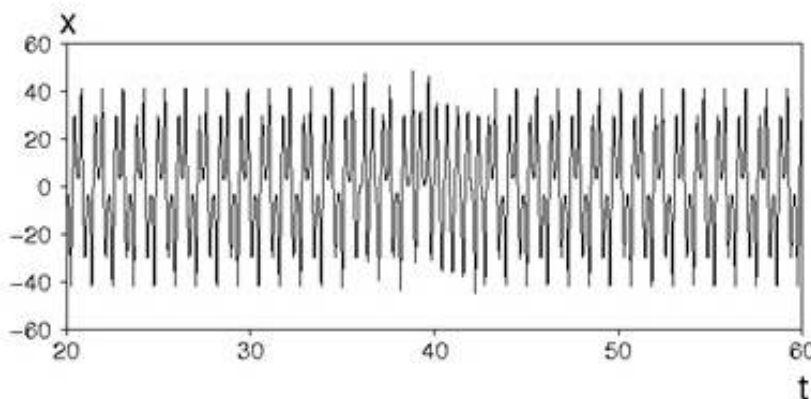


Рис. 30. Пример перемежаемости.

2.5 Примеры динамических систем с детерминированным хаосом

В качестве примера нелинейной системы рассмотрим периодически возбуждаемый маятник, т.е. колеблющийся маятник, на который время от времени воздействует внешняя сила. Уравнение его движения

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \gamma \frac{d\varphi}{dt} + g \sin \varphi = F \cos \omega t \quad (7)$$

где γ — постоянная затухания, g — ускорение свободного падения, ω — частота возбуждающей силы; масса принята за единицу. Это уравнение численно интегрировалось для различных значений параметров (γ , g , F , ω), и в Табл. 1 показано, что зависимость угла θ от времени «выглядит хаотической», если амплитуда вынуждающей силы превосходит некоторую пороговую величину F_c . То, что сигнал выглядит случайным, является возможным, но не очень точным критерием хаотичности.

Чтобы отличить от хаоса многопериодическое движение (которое, как и хаос, может выглядеть сложным), часто прибегают к фурье-преобразованию сигнала $x(t)$:

$$x(\omega) \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T e^{i\omega t} x(t) dt \quad (8)$$

$$P(\omega) = |x(\omega)|^2 \quad (9)$$

Для многопериодического движения спектр мощности состоит только из дискретных линий на определенных частотах, тогда как хаотическое движение, которое совершенно апериодично, представляется сплошной широкой полосой на низких частотах. Такой переход от периодического движения к хаосу представлен во второй строке Табл. 1, где показан спектр мощности x -компоненты скорости жидкости в эксперименте Бенара.

Табл. 1. Обнаружение хаоса в простых системах.

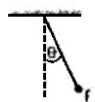
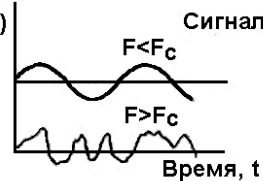
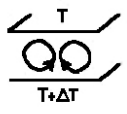
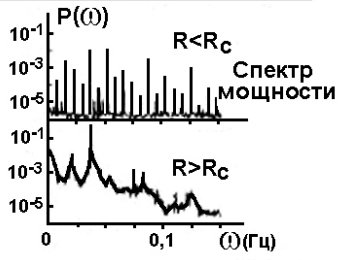
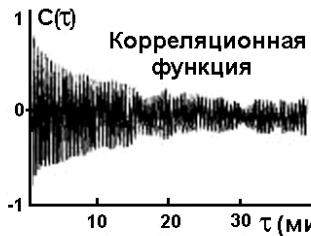
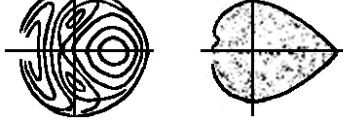
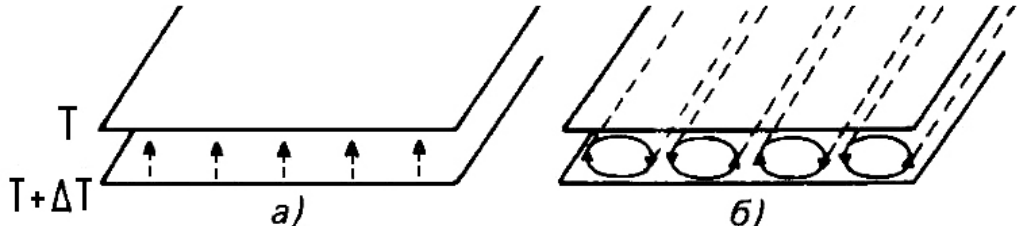
<p>Маятник</p> 	$\ddot{\theta} + \gamma \dot{\theta} + g \sin \theta = F \cos \omega t$ $x = \theta, \quad y = \theta, \quad z = \omega t$ $\dot{x} = y$ $\dot{y} = -\gamma y - g \sin z + F \cos z$ $\dot{z} = \omega$	<p>$\theta(t)$</p>  <p>Сигнал $F < F_c$ $F > F_c$ Время, t</p>
<p>Эксперимент Бенара</p> 	$\dot{x} = -\sigma x + \sigma y$ $\dot{y} = r x - y - x z$ $\dot{z} = x y - b z$	<p>$P(\omega)$</p>  <p>Спектр мощности $R < R_c$ $R > R_c$ ω (Гц)</p>
<p>Реакция Белоусова-Жаботни-ского</p> <p>$\text{Ce}_2(\text{SO}_4)_3$</p> <p>$\text{Ce}^{4+}$</p>	$\dot{x} = F(x, \lambda)$ $x = [C_1, C_2, \dots, C_d]$	<p>$C(\tau)$</p>  <p>Корреляционная функция τ (мин)</p>
<p>Система Хенона - Хейлесса</p>	$H = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 (p_i^2 + q_i^2) + q_1^2 q_2 - \frac{1}{3} q_2^3$ $\dot{p} = \frac{\partial H}{\partial q}; \quad \dot{q} = \frac{\partial H}{\partial p}$	<p>Отображение Пуанкаре</p> 
 <p>а) б)</p>		

Рис. 31. Неустойчивость Бенара.

Другим примером возникновения детерминированного хаоса является возникновение ячеек Бенара. В этом эксперименте слой жидкости (с положительным коэффициентом объемного расширения) подогревается снизу в поле тяготения, как показано на рис. 31. Нагретая жидкость вблизи дна «стремится» подняться, а холодная вблизи крышки — опуститься, но этим движениям

противодействуют вязкие силы. При малых разностях температур ΔT преобладает вязкость, жидкость покоится и тепло переносится постоянной теплопроводностью. Это состояние становится неустойчивым при критическом значении R_a числа Рэлея R (пропорционального ΔT , и появляются стационарные конвективные валы. С дальнейшим ростом R после второго порога R_c наблюдается переход к хаотическому движению. В Табл.1 приведены спектры мощности x -компоненты скорости, измеренной по эффекту Доплера при рассеянии света.

Для теоретического описания эксперимента Бенара Э.Лоренц упростил сложные дифференциальные уравнения, описывающие эту систему, и получил дифференциальные уравнения так называемой модели Лоренца (см. систему). Численный анализ этой простой системы нелинейных дифференциальных уравнений показывает, что её переменные могут проявлять хаотическое поведение при превышении порога r_c .

Замечание. Уравнения Лоренца описывают эксперимент Бенара только непосредственно вблизи перехода от теплопереноса к конвективным валам, так как пространственные фурье-коэффициенты, оставленные Лоренцем в системе уравнений, описывают только простые валы. Хаос, обнаруженный Лоренцем в уравнениях (3), таким образом, отличается от хаоса, наблюдаемого по экспериментальному спектру мощности (Табл. 1). Для описания экспериментально наблюдаемого хаоса необходимо сохранить гораздо больше пространственных фурье-компонент.

Ещё одна экспериментальная система, в которой подробно исследовано хаотическое поведение, — это реакция Белоусова — Жаботинского. Органические молекулы (например, малоновой кислоты) окисляются бромат-ионами при катализе окислительно-восстановительной системой ($\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$). Реагентами являются $\text{Ce}_2(\text{SO}_4)_3$, NaBrO_3 , $\text{CH}_2(\text{COOH})_2$, H_2SO_4 , которые участвуют в 18 элементарных реакциях.

Обобщенные уравнения для концентраций (C_i) реагентов в системе химических реакций — также система нелинейных дифференциальных уравнений 1-го порядка:

$$\frac{d}{dt} X = F(x, \lambda), \quad (10)$$

где $x = (C_1, C_2, \dots, C_d)$, F — нелинейная функция $\{C_i\}$, λ — внешний управляющий параметр. Переменная, проявляющая хаотическое поведение в реакции Белоусова — Жаботинского, — концентрация с ионов Ce^{4+} , измеряемая по селективному поглощению света этими ионами. Среднее время пребывания веществ в проточном реакторе является внешним управляющим параметром, соответствующим R в предыдущем эксперименте.

В Табл. 1 показан переход к хаосу в этой системе, обнаруживаемый по изменению автокорреляционной функции

$$C(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \hat{C}(t) \hat{C}(t + \tau) dt; \quad \hat{C}(t) = C(t) - \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T C(t) dt \quad (11)$$

Эта функция есть мера корреляции между последовательными значениями сигнала. Для регулярных движений она постоянна или осциллирует, а в хаотическом режиме быстро падает (чаще всего экспоненциально).

Наконец, рассмотрим простой пример из классической механики — неинтегрируемую систему, проявляющую хаотическое поведение. Гамильтониан H этой системы приведен в Табл. 1.

Гамильтониан, оператор Гамильтона – оператор полной энергии $\hat{H} = \hat{E} + \hat{U}$, где \hat{E} – оператор кинетической энергии, \hat{U} – оператор потенциальной энергии.

Чтобы обнаружить хаос, строились точки, в которых траектория в фазовом пространстве $x(t) = [p_1(t), p_2(t), q_1(t), q_2(t)]$ (12)

пересекает плоскость, пересекает плоскость (p_2, q_2) (здесь p_i и q_i — импульсы и координаты). Так получают сечения Пуанкаре. В Табл. 1 показано, что для системы Хенона — Хейлеса при достаточно большой энергии (которая является управляющим параметром для этой системы) точки на сечении Пуанкаре начинают заполнять плоскость. Это свидетельствует о высокой степени нерегулярности, т. е. о хаотическом движении траектории в фазовом пространстве.

Ещё один пример возникновения хаоса - динамика популяции в замкнутой среде. Он был описан ещё в 1845 г. П. Ф. Ферхюльстом. Относительная (нормированная) численность особей x_{n+1} в $n+1$ -й год пропорциональна численности в предыдущий год, а также свободной части жизненного пространства, которая пропорциональна $(1 - x_n)$, т. е. $x_{n+1} = r x_n (1 - x_n)$, где параметр r зависит от плодовитости, реальной площади для жизни и т. д.

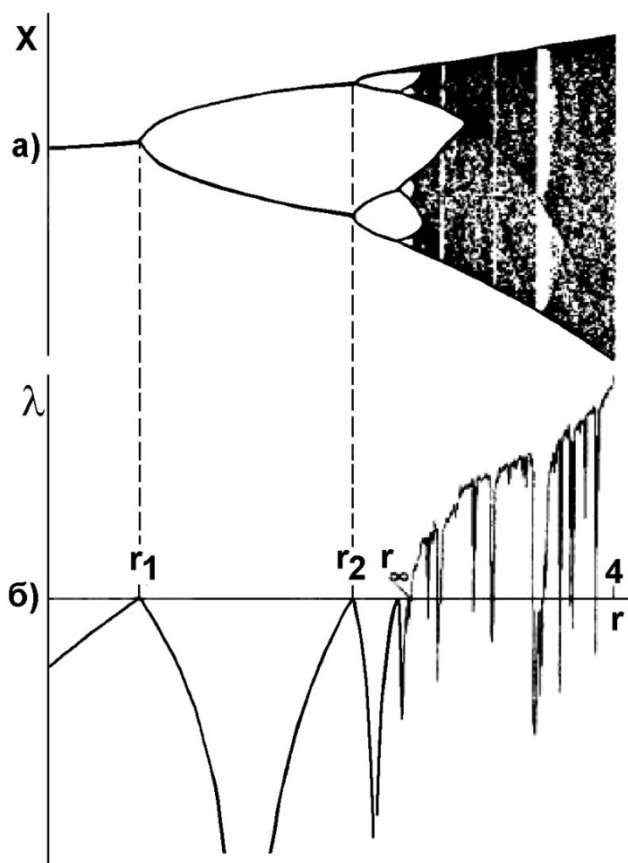


Рис. 32. а - Итерации логистического отображения (динамика эволюции популяции Ферхюльста); б - показатель Ляпунова L.

Уравнение для динамики популяции подходит и для решения задачи о банковских сбережениях при стабилизирующем росте процента. Пусть денежный вклад z_0 растёт в соответствии с процентом ε следующим образом: $z_{n+1} = (1+\varepsilon)z_n = \dots = (1+\varepsilon)^{n+1}z_0$. Желая воспрепятствовать беспредельному обогащению, какой-нибудь политик мог бы предложить, чтобы процент уменьшался пропорционально z_n , т. е. $\varepsilon \rightarrow \varepsilon_0(1-z_n/z_{max})$. Тогда счёт в банке изменялся бы в соответствии с законом $z_n = [1 + \varepsilon_0(1-z_n/z_{max})]z_n$, который превращается в уравнение (логистическое отображение, которое например, описывает и поведение быстро успокаивающегося ротатора, на который действуют толчки).

$$x_{n+1} = f_r(x_n) = rx_n(1-x_n) \quad (13)$$

при $x_n = z_n \varepsilon_0 / z_{max}(1+\varepsilon_0)$ и $r = z_{max}(1+\varepsilon_0)^2 / \varepsilon_0$.

Казалось бы, можно ожидать, что благодаря механизму обратной связи, интересующие нас величины (численность популяции или величина банковского счёта) будут стремиться к некоторым средним значениям. Однако, итерации x_1, x_2, \dots отображения (13) при варьировании внешнего параметра r демонстрируют довольно сложное поведение, которое становится хаотическим при больших r (рис. 32). Свойства фейгенбаумовского перехода мы рассмотрим в отдельной лекции.

Рассмотрим теперь ещё один важный случай - переход к хаосу через перемежаемость.

Под перемежаемостью понимают такой вид сигнала, в котором случайным образом чередуются длинные регулярные (ламинарные) фазы (так называемые окна) и относительно короткие нерегулярные всплески. Известно, что число хаотических всплесков нарастает при увеличении внешнего параметра, а это означает, что перемежаемость представляет собой непрерывный переход от регулярного движения к хаотическому. Перемежаемость позволяет дать универсальное объяснение происхождения фликкер-шума в нелинейных системах.

При численном решении дифференциальные уравнения модели Лоренца для Y -компоненты обнаруживается поведение, показанное на рис. 33. При $r < r_c$ реализация $Y(t)$ представляет собой устойчивое периодическое движение. При превышении порога r_c колебания прерываются хаотическими всплесками, которые с ростом r становятся все более частыми, пока движение полностью не хаотизируется. Это связано с тем, что устойчивым колебаниям при $r < r_c$ соответствует устойчивая неподвижная точка на отображении Пуанкаре. При $r > r_c$ эта точка становится неустойчивой. Так как это может произойти лишь тремя путями, то различают три рода перемежаемости.

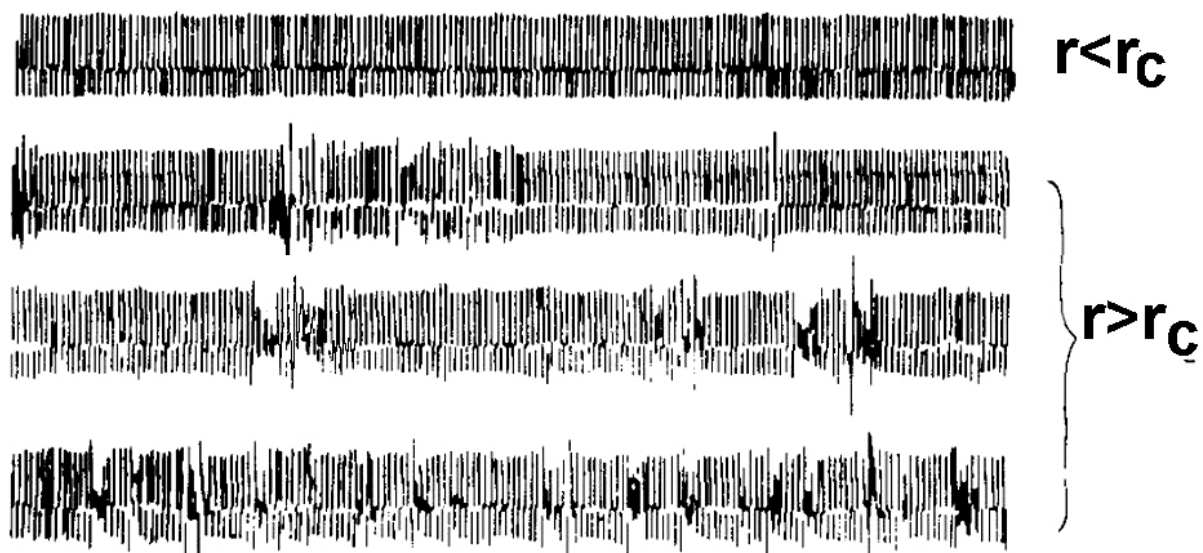


Рис. 33. Развитие во времени одной из составляющих в модели Лоренца.

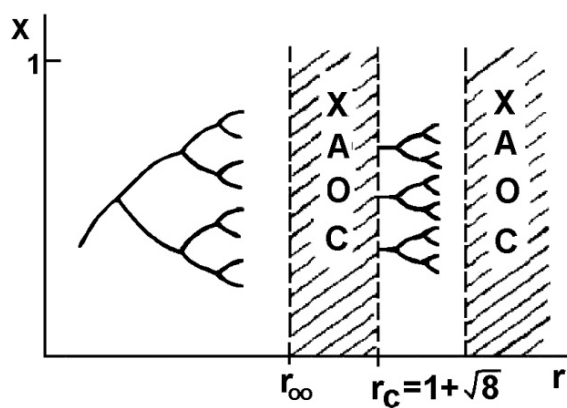


Рис. 34. "Окно" периода 3 в области хаотического режима.

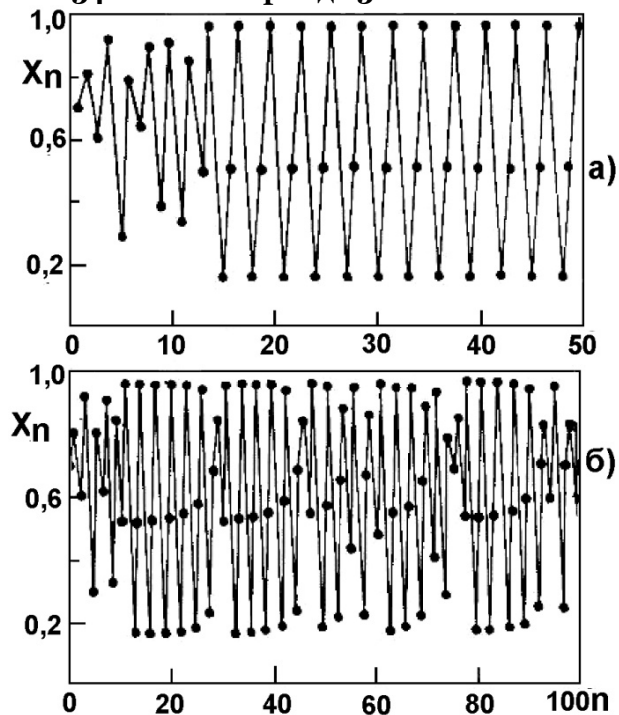


Рис. 35. Последовательность итераций логистического отображения, начинающаяся с $x=0,7$; а - в области устойчивого цикла периода 3 при $r_c-r=-0,02$; б - в области перемежаемости при $r_c-r=0,002$.

Пример перемежаемости 1-го рода — уже упоминавшееся ранее логистическое уравнение $x_{n+1}=f_r(x_n)=rx_n(1-x_n)$. Численный счёт показывает, что при $r_c = 1 + \sqrt{8}$ это отображение порождает цикл периода три с последующими бифуркациями, т. е. в хаотическом режиме существует окно (рис. 34). Последовательные итерации при значениях r , больших и меньших r_c , представлены на рис. 35. При r , несколько большем r_c , существует регулярный цикл периода 3, а ниже ламинарные области прерываются хаосом.

Перемежаемость тесно связана с фликкер-шумом, что мы обсудим в отдельной лекции.

Исследование эволюции динамических систем — практически важная задача. Например, при обтекании упругой пластины сверхзвуковым потоком воздуха возможно возбуждение колебаний этой пластины (в том числе и хаотических) и последующее ее механическое разрушение. Этот эффект известен под названием флаттер пластины. Он был причиной крупных авиакатастроф в эпоху развития сверхзвуковой авиации. Такие колебания наблюдались также во внешних оболочках ракет "Сатурн", доставивших человека на Луну в начале семидесятых.

Хаотические колебания возможны и в других механических и магнитомеханических устройствах, например, в устройствах на магнитной подушке, которые появляются при увеличении скорости движения. Хаотические обращения магнитного поля Земли с интервалом в сто тысяч лет заставили заняться изучением так называемого магнитного динамо — проводящего диска, вращающегося в магнитном поле, где такой эффект был действительно обнаружен. Нелинейные колебания в сердечной мышце ответственны за сокращения сердца и поддержания жизни организма. Однако в отсутствие управляющих сигналов со стороны головного мозга они могут перейти в хаотический режим и привести к смерти. Экономические потрясения (кризисы) нашего столетия вынуждают задумываться о возможности их прогнозирования. Атмосферные катаклизмы, такие, как, например, торнадо (мощные атмосферные вихри), иногда способны разрушить целые деревни и города и унести десятки и сотни человеческих жизней. Как и где они зарождаются? Нельзя ли их предотвратить или предсказать их появление? Наконец, неразгаданная пока тайна нашей памяти, проблема поиска информации в ней и т.д. и т.п.

Понимание природы детерминированных хаотических процессов необходимо прежде всего для того, чтобы ими управлять или предсказывать (с какой-то вероятностью) их эволюцию. В последнее время выяснилось, что наложение слабой обратной связи на систему может привести к трансформации хаотического сигнала в регулярный во времени. Оказалось, что управлять хаотическими системами в этом смысле даже проще, чем детерминированными. Это расширяет возможности строительной механики, авиации, практической твердотельной электроники, лазерной техники. Это также очень важно в биологии, потому что в режиме управляемого хаоса работает, например, наше сердце. Возможно, на этом пути лежит и решение проблемы управляемого термоядерного синтеза. Неустойчивости в плазме — это ведь тоже источник хаотического, непредсказуемого ее поведения.

Детерминированные хаотические сигналы могут быть и полезны, например, при кодировании и декодировании секретной информации. Наконец, изучение всех этих проблем, часто очень непростых с математической точки зрения, привело к появлению новых идей в физике, нового языка хаотической динамики — фрактальной геометрии, странных аттракторов и многого другого, что составляет содержание современной науки о детерминированном хаосе.

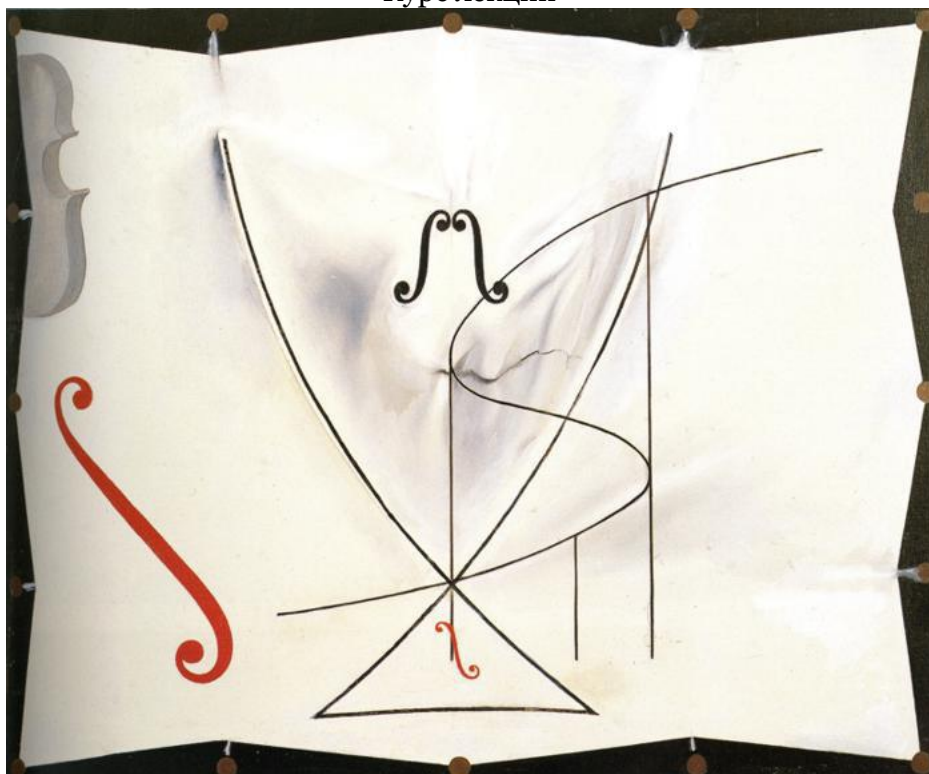
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Химический факультет

Междисциплинарный университет Бекмана

Профессор, д.х.н.
И.Н. Бекман

КАТАСТРОФЫ

Курс лекций



Последняя картина Сальвадора Дали "Ласточкин хвост" (масло)

Содержание

От автора

Предисловие

1. Элементы теории катастроф

2. Примеры теории катастроф

3. Катастрофы в математике

4. Катастрофы в развитии мира

5. Катастрофы в природе

6. Катастрофы в физике

7. Катастрофы в химии

8. Катастрофы в технике

9. Катастрофы на транспорте

10. Катастрофы на предприятиях ядерного топливного цикла

11. Катастрофы на АЭС

12. Биологические, экологические и медицинские катастрофы

13. Катастрофы в экономике

14. Революции, мятежи и восстания

15. Катастрофа личности

Заключение

Аннотация

Предлагаемое учебное пособие - конспект лекций профессора МГУ И.Н. Бекмана, читаемых слушателям Междисциплинарного дистанционного университета по проблеме применения математической теории катастроф для качественного описания катастроф, происходящих в природе, технике, в обществе и личной жизни. В пособии изложены основные аспекты элементарной теории катастроф, под которой понимается раздел математики, занимающийся описанием динамических систем (теория бифуркаций дифференциальных уравнений, теория особенностей вещественнозначных гладких функций, топологическая динамика, и т.п.). Даны примеры поведения разрывных функций, которые в той или иной степени иллюстрируют катастрофы в реальных (природных, техногенных) системах. Основное внимание уделено перспективам использования теории катастроф в различных областях прикладной математики, физики, химии, техники, биологии, экологии, медицине, экономике, а также для предсказания общественных катаклизмов и революций.

Учебное пособие предназначено для лиц, интересующихся применением теории катастроф и теории риска для развития таких современных наук, как анализ и управление сложными системами, синергетика, геометрия фракталов, неравновесная термодинамика, информатика и кибернетика.

ОТ АВТОРА

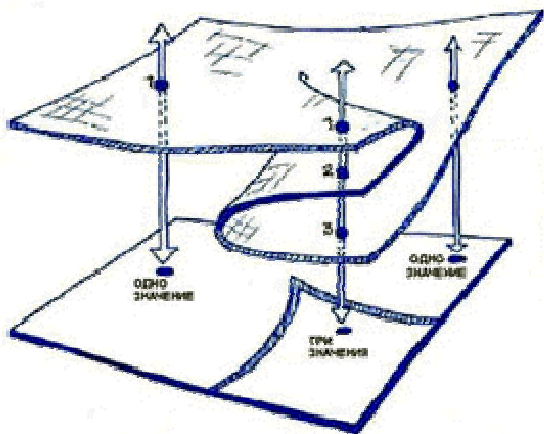
Мой конь Сатэра был авантюристом - хватал адреналин полно грудью. На Алтае он не просто спускался с горы, а летел вскачь, совершая эффектные прыжки через препятствия. Всё это ему (и мне, т.к. сидел на нём именно я) сходило с рук (или с копыт?). Но однажды, в запале, он решил перескочить в два прыжка пропасть. Попытка не удалась. Рухнули мы на 100 м вниз, шлёпнулись на дно стакана с вертикальными стенками и сильно побились. Без надежды на возврат в цивилизацию.

Вот там, выбираясь из-под Сатэры, и снимая с него седло, вспомнил я теорию катастроф. Математики в ней много, но не помогла она нам в реальном приключении. Ибо не теория это вовсе, а так - умонстроение. А настроение меняется: то ты, как пуганая ворона, куста боишься, то степным волком себя ощущаешь...

Конечно, я и сам виноват. Надо было прочесть Сатэре лекцию по теории катастроф, объяснить ему силу бифуркаций и аттракторов. Глядишь, был бы он осторожнее.

Теперь я исправился. Не поленился написать учебное пособие. Может, оно кого убережёт от падения в пропасть, или от какой другой напасти.

Жаль - коня у меня нет. Не с кем проверить теорию на практике...



Оглавление

ОТ АВТОРА.....	2
ПРЕДИСЛОВИЕ.....	4
Лекция 1. Элементы теории катастроф.....	7
1.1 Устойчивость, бифуркации, нелинейные системы.....	7
1.2 Особенности, каустики, складки и сборки.....	10
1.3 Элементарные катастрофы.....	18
Лекция 2. ПРИМЕРЫ ТЕОРИИ КАТАСТРОФ.....	25
2.1 Иллюстрации теории катастроф.....	25
2.2 Машина катастроф Зимана.....	27
2.3 Качалки.....	31
2.4 Механика конструкций.....	32
2.5 Геометрия жидкости.....	34
2.6 Оптика и теория рассеяния.....	34
2.7 Термодинамика и фазовые переходы.....	35
2.8 Биология и экология.....	38
2.9 Экономика.....	41
2.10 Психология.....	42
2.11 Социологическое моделирование.....	43

ПРЕДИСЛОВИЕ

Познание мира и математика идут рука об руку. Я сижу за рулём, время идёт монотонно, и расстояние от Москвы постепенно увеличивается, а до дачи уменьшается. Мне приятно, что в арифметике есть уравнение прямой, которое применимо для описания моей ситуации. Активность изотопа монотонно падает во времени, и в математике можно подыскать функцию (экспоненту), которая адекватно опишет эксперимент. День сменяется ночью, а зима летом, и в математике есть синусоида, и множество других периодических функций. Бери - не хочу...

Казалось бы, всё, что в жизни случается, можно количественно описать, используя современную математику.

Однако оказалось, что это не так. Совсем не так.

Позавчера температура на улице была -5° , вчера - -10° , сегодня - -15° . Сколько будет завтра? Математика: -20° . Я выхожу на улице в шубе и валенках, а там - $+3^{\circ}$! Снег растаял, кругом ручьи и я в поту. Катастрофа! Куда математика смотрела?! Не смогла!

Мы одиннадцать лет исправно ходим в школу, думаем так будет вечно. И вдруг на тебе: я в армии во флоте, иду в Сирию, или в далёком городе, в институте, пишу с друзьями пулю. Я еду в поезде: день-ночь, день-ночь, из окна дует, но я - в купе и вагон-ресторан есть. Увы! Рельсы кончились. Что дальше? Сидеть на месте, пешком идти, такси вызвать, или лучше корабль? Был холостым, стал женатым, не было детей, родились. Акции компании второй год постоянно растут, я вложил в них все свои средства, компания лопнула. Старился потихоньку, мемуары писать собрался, а тут инфаркт. И всё!

Катастрофа? Катастрофа!

Землетрясения, цунами, извержения вулканов, взрывы АЭС, падающие самолёты, переворачивающиеся корабли, сталкивающиеся автомобили, снежные лавины и сели... Продолжите сами список. Всё это - нарушения стабильности, постоянства, порядка. Нарушения резкие, иногда - мгновенные. Можем ли мы их предсказать или как-то избежать? Нет!

Нас давит страх неизвестности, гнетёт невозможность предсказать будущее. А знать его хочется. Тогда бы мы смогли управлять своей судьбой и судьбой мира. Без опоры на астрологов с их гороскопами и без опасности спадания в хаос.

А что ж математика? Она последние столетия надёжно предсказывала монотонное будущее, считая катастрофы-революции-мировые войны досадными недоразумениями, некоторыми флуктуациями (шумами) на устойчивой в целом картине. Дифференциальное исчисление утверждало, что все зависимости можно описывать непрерывными функциями, причём такими у которых малое изменение аргумента приводит к небольшим изменениям функции. Естественно, что никаких катастроф такая математика описать не могла.

Так продолжалось до конца 19-го века. Но в начале 20-го века ситуация стала меняться.

Математики постепенно занялись неустойчивыми моделями, приводящими к резкому нарушению равновесия. Появились работы, демонстрирующие, что неустойчивости столь же реальны, как и состояния гармонии. Оказалось, что любая система, развиваясь, проходит этапы перестройки, резкого изменения, сопровождающиеся перегруппировкой сил, переустройством равновесия. Эти этапы характеризуются временным преобладанием одной из сил, что приводит к хаосу, разрушающему предыдущие структуры; затем происходит гармонизация, равновесие восстанавливается, но уже в новом, качественно ином состоянии. Обнаружилось множество дифференциальных уравнений, которые вообще не имеют решения! К радости метеорологов математики доказали, что погоду в принципе предсказать невозможно. Как и любое другое будущее.

Одной из математических теорий, описывающих резкие переходы, является теория катастроф, которая зародилась в рамках теории динамических систем, как союз теории особенностей и динамики. Предмет её не определён, так что основоположники теории катастроф считали её умонастроением, а не теорией в обычном смысле. Таковой она и остаётся до сих пор.

Тем не менее, рассмотрение типичности, структурной устойчивости, способ решения задач математического анализа геометрическими методами оказалось полезным как для самой математики, так и для ряда её практических приложений.

Первые фундаментальные результаты в области динамических систем, относящиеся к теории катастроф, принадлежат французскому математику Анри Пуанкаре (1854-1912) (метод нормальных форм в теории дифференциальных уравнений), который изобрёл топологию (раздел геометрии, который изучает общие свойства любых геометрических фигур) и доказал, что задача взаимодействия трёх тел не имеет решения. Он рассмотрел возможности нерегулярной динамики в детерминированных системах и показал, что незначительные изменения в начальных условиях могут приводить к совершенно непредсказуемым результатам. В его книге «Наука и метод» говорится: «В неустойчивых системах совершенно ничтожная причина, ускользающая от нас по своей малости, вызывает значительные действия, которые мы не в состоянии предугадать... Предсказание становится невозможным, мы имеем перед собой явление случайное».

Определённый вклад в теорию катастроф сделали А.М. Ляпунов (1857-1918) - структурная устойчивость, А.А. Андронов (1901-1952) - теория бифуркаций динамических систем и общая теория колебаний, тополог Х. Уитни (1907-1989) - особенности гладких отображений и др. Непосредственно теорию катастроф создали Рене Том (1923-2002) - теория особенностей и К. Зиман (1925-) - автор термина "теория катастроф", изобретатель машины катастроф, специалист в области геометрической топологии и теории сингулярности.

Рене Фредери́к Том (René Frédéric Thom)— французский математик. Основные направления научных интересов - алгебраическая топология, дифференциальная топология. Занимался теорией особенностей, где создал её раздел — теорию катастроф, которую он применял к различным вопросам — от лингвистики до объяснения формы цветков, при этом, в отличие от своих последователей (К.Зимана и др.), Том значительно более осторожен в своих предположениях.

Теория катастроф, как наука, появилась в книге Рене Тома "Структурная устойчивость и морфогенез" (1972). Он использовал топологическую теорию динамических систем, ведущую начало от работ Пуанкаре, для моделирования разрывных изменений в явлениях природы, и особенно в биологии; он указал на важность в этих рассуждениях требования структурная устойчивость, или нечувствительности к малым возмущениям. Он также отметил, что при некоторых условиях из этого требования вытекает, что изучаемую систему можно описать локально посредством одной из семи стандартных форм - элементарных катастроф.

Бурное развитие теории катастроф в 1970-е — 1990-е годы связано с работами Дж. Боардмана, Е. Брискорна, Дж. Брюса, Дж. Мазера, Б. Мальгранжа, Т. Волла, В.И. Арнольда (1937-2010) и его учеников.

Популярность теории катастроф была вызвана заявлениями её апологетов, что по своей значимости теорию катастроф можно сравнить с изобретением математического анализа, и даже говорить о революции в математике.

Целью работ в этом направлении явилось построение динамических систем с иерархической организацией, обеспечивающей устойчивость, взаимодействие со средой и эволюцию. В случае построения конечного числа "элементарных" систем, из которых можно было бы по определённым законам строить более сложные системы и описывать переходы между ними ("катастрофы"), то был бы создан мощный метод анализа самых разнообразных явлений природы (развитие эмбриона, человеческий язык, форма облаков и т.п.). Преимуществом считалось то, что теория не требует подробных математических моделей и может описывать ситуации не "количественно", а "качественно", а её результаты и выводы иллюстрируются простыми геометрическими образами. Эту теорию стали применять ко всем нерешённым проблемам: устойчивость кораблей, психические явления, социальные и экономические процессы, химические реакции и т.д. и т.п.

Общественность возбудилась: неужели в нашем распоряжении появилась теория, с помощью которой возможно предсказание любых катастроф?

Реакция не заставила себя ждать: теорию подвергли резкой критике. Например, Г. Б. Колата опубликовал на эту тему статью под названием «*The Emperor Has No Clothes*» - «А король-то голый!». Математикам теория катастроф понравилась, т.к. она красива, но для инженеров и естествоиспытателей эта теория практически всегда. Например, в открытых системах, а также в большинстве закрытых систем, природные процессы протекают в соответствии с совершенно иными, нежели постулируемые теорией катастроф, закономерностями.

Да, к примеру, теория катастроф иллюстрирует, каким образом происходит разрушение моста при критических нагрузках, но беда в том, что, инженеры решили эту проблему задолго до появления этой теории. Устойчивость кораблей и множество других задач были решены и решаются без какого-либо участия теории катастроф. Вот когда они решены, тогда и появляется эта теория, объясняя некоторые аспекты происходящих явлений.

Теория катастроф не позволяет ни предсказывать, ни управлять реальными катастрофами. Пуанкаре умер от случайного аппендицита, Ляпунов застрелился, Тома - скончался от инфаркта. Своей жизнью они доказали бесполезность теории катастроф для практики.

Теория катастроф - это продолжение анализа и его развитие в собственных рамках (а не радикально новое направление или заменитель всех старых методов). Она применима лишь в ограниченной и очень специальной области. В подавляющем числе случаев - это чисто качественная теория.

Если в эксперименте получена некоторая зависимость, то к ней можно подогнать прямую, рассчитать параметры этой прямой, найти их ошибки, проверить гипотезу линейности и т.п. Ничего подобного сделать с чернойбыльской катастрофой, инфарктом или с превращением воды в лёд сделать не удастся. Ни к чему теорию катастроф вы не подгоните, никаких параметров рассчитать не получится, и никаких предсказаний развития событий теория катастроф не даст. Теория катастроф - мышление по аналогии.

Если Вы после автомобильной аварии, в которой вам удалось прервать монотонный путь своего авто встречей со столбом, лежите в гипсе, и Вас утешает мысль, что в математике

есть функция, претерпевающая разрыв в неположенном месте, то Вам сюда, в теорию катастроф.

В принципе, теория катастроф не является чисто качественной, но и количественной её пока не назовёшь.

Физика и химия извлекают из теории катастроф какую-то выгоду, поскольку они имеют дело с "простыми" системами неорганизованной сложности. Организованная сложность биологии представляется объектом изучения в ближайшем будущем, но здесь уже понадобится вся теория динамических систем (имеющая теорию катастроф лишь малой, хотя и существенной составляющей). Применение теории к анализу организованной сложности социальных систем - дело ещё более далёкого будущего.

Единственное направление, где теорию катастроф можно рассматривать, как нечто полезное для практики, это - образование. Надо же что-то краткое писать в зачётке: синергетика, кибернетика, теория катастроф, либо что-то ещё такое же умное...

Понятно, что вопль студента, вылетающего из аудитории: "Спихнул катастрофы!", гораздо эффектней идентичной по смыслу фразе: "Сдал экзамен по теории особенностей вещественнозначных гладких функций и топологии динамических систем".

В данном курсе лекций мы рассмотрим основные особенности теории катастроф, а затем попытаемся применить эту математику для описания реальных катастроф, аварий, революций, бунтов и других катаклизмов. Разовьём концепцию риска.

Может, что и получится.

Лекция 1. Элементы теории катастроф

The last straw breaks the camel's back.

Последняя соломинка ломает спину верблюда.

Последняя капля переполняет чашу.

Теория катастроф - часть качественной теории сложных нелинейных систем. Её основой является теория особенностей гладких (дифференцируемых) отображений, сформировавшаяся на стыке топологии и математического анализа, и являющаяся обобщением задач на экстремум в математическом анализе. Элементарная теория катастроф сводит огромное многообразие ситуаций к небольшому числу стандартных схем, которые можно детально исследовать. Анализ качественного поведения нелинейных динамических систем при изменении описывающих их параметров, позволяет описывать состояния, далёкие от равновесия, а также предсказывать резкую смену этих состояний.



Теория катастроф - программа прогнозирования неустойчивости различных систем. Такое название она получила потому, что потеря устойчивости может быть катастрофична, даже если не приводит к гибели или разрушению системы, а лишь обуславливает переход к иной траектории развития.

В данном курсе лекций основное внимание уделено сложным динамическим системам, их анализу и управлению. Под сложными системами здесь понимаются нелинейные системы, свойства которых не сводимы к свойствам компонентов и проявляют вновь возникающие, или «эмерджентные» (*emerge* - возникать) черты.

Сложные динамические системы включают флуктуирующие, случайным образом изменяющиеся компоненты. Отдельные флуктуации или их сочетания в системе с обратной связью, усиливаясь, вызывают разрушение прежнего состояния системы ("катастрофа"). Случайные воздействия в момент перелома (в точке бифуркации) могут подтолкнуть систему на новый путь развития; после же выбора одного из возможных путей, траектории развития, действует однозначный детерминизм - развитие системы предсказуемо до следующей точки бифуркации. Так случайность и необходимость дополняют друг друга.

В далеком от равновесия состоянии системы на первый план выступают нелинейные соотношения, слабое внешнее воздействие может порождать неожиданное, непредсказуемое поведение системы в целом. Иногда в состояниях, далеких от равновесия, очень слабые флуктуации или внешние возмущения могут усиливаться до огромных, скачкообразным образом разрушающих всю прежнюю структуру системы и переводящих её в иное состояние.

В этой лекции мы обсудим элементы, на которых базируется теория катастроф. Сама теория будет изложена в последующих лекциях.

Сначала дадим определения некоторых понятий.

Катастрофа с точки зрения теории систем — скачкообразное изменение, возникающее в виде внезапного отклика системы на плавное изменение внешних условий.

Теория катастроф — раздел математики, включающий в себя теорию бифуркаций, дифференциальных уравнений (динамических систем) и теорию особенностей гладких отображений.

Теория бифуркаций динамических систем — теория, изучающая изменения качественной картины разбиения фазового пространства, в зависимости от изменения параметра (или нескольких параметров).

Бифуркация — приобретение нового качества в движениях динамической системы при малом изменении её параметров. **Бифуркация** — раздвоение, разделение, разветвление чего-либо. Состояние процесса в динамической системе, при котором резко возрастают флуктуации, и выход из которого возможен по двум существенно различным трудно предсказуемым направлениям — хаотическому или упорядоченному.

Динамическая система — математическая абстракция, предназначенная для описания и изучения эволюции систем во времени. Представляет собой математическую модель некоторого объекта, процесса или явления.

1.1 Устойчивость, бифуркации, нелинейные системы

При анализе поведения динамической системы в первую очередь обращают внимание на её устойчивость, т.е. на реакцию динамической системы на малое возмущение её состояния. Если сколь угодно малые изменения состояния системы начинают нарастать во времени, система неустойчива. Если же малые возмущения затухают со временем, система устойчива.

Устойчивость — способность системы сохранять текущее состояние при наличии внешних воздействий. В механике устойчивость характеризуется ответом на малое возмущение системы, находящейся в механическом равновесии. Различают асимптотическую устойчивость, устойчивость по Лагранжу, по Пуассону, по Ляпунову и др.

Решение дифференциального уравнения называется устойчивым, если поведение решений с близким начальным условием «не сильно отличается» от поведения исходного решения. Существуют различные критерии устойчивости: устойчивость по Ляпунову, асимптотическая устойчивость, экспоненциальная и т.д.

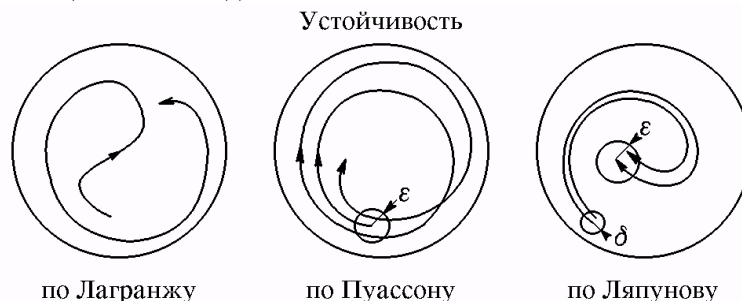


Рис. 1. Устойчивости по Лагранжу (траектория остаётся в замкнутой области), по Пуассону (траектория многократно возвращается в ε -окрестность стартовой точки) и по Ляпунову (две близкие на старте траектории остаются близкими всегда).

Теория катастроф в основном изучает статические неустойчивости, т.е. только те, которые исключительно связаны с действием потенциальной энергии.

Потенциальная энергия — функция координат, являющаяся слагаемым в лагранжиане системы, и описывающая взаимодействие элементов системы. Потенциальная энергия принимается равной нулю для некоторой конфигурации тел в пространстве, выбор которой определяется удобством дальнейших вычислений. Процесс выбора данной конфигурации называется нормировкой потенциальной энергии. Корректное определение потенциальной энергии может быть дано только в поле сил, работа которых зависит только от начального и конечного положения тела, но не от траектории его перемещения. Такие силы называются консервативными (потенциальными).

Лагранжиан в классической механике — разность между кинетической и потенциальной энергией.

Консервативные силы (потенциальные силы) — силы, работа которых не зависит от вида траектории, точки приложения этих сил и закона их движения и определяется только начальным и конечным положением этой точки. Это такие силы, работа которых по любой замкнутой траектории равна 0.

Понятие устойчивости необходимо для описания сложной, многокомпонентной системы, поскольку её развитие сопровождается потерей устойчивости некоторыми режимами её функционирования и рождением новых, устойчивых. Одни структуры гибнут, рождаются новые, которые видоизменяются, совершенствуются и затем вновь уступают место новым. Изменения могут накапливаться плавно, а могут происходить скачком в виде катастроф. При "фазовых переходах" формирование новых структур сопровождается потерей устойчивости (даже разрушением) предшествующих. Система переходит из одного режима функционирования в другой режим. Старый режим потерял устойчивость, возник новый устойчивый режим, который может наследовать некоторые свойства предыдущего, а может быть и резко отличным. В таких случаях говорят о бифуркациях динамических систем.

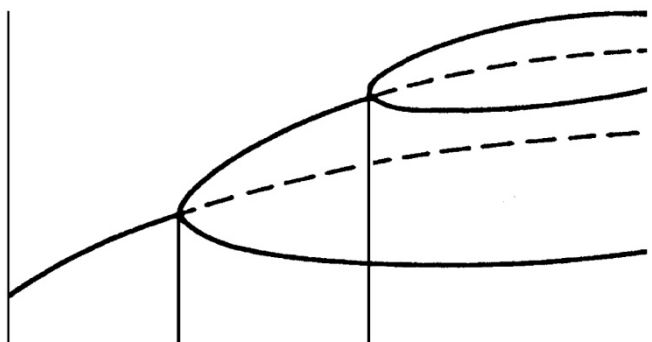


Рис. 2. Последовательность бифуркаций.

Теория бифуркаций — один из разделов теории гладких динамических систем. Бифуркация означает "раздвоение"; в этом смысле этот термин употребляется, например, в анатомии ("бифуркация

bronха"). В математике он применяется для обозначения качественных изменений рассматриваемых объектов при изменении параметров, от которых эти объекты зависят. Термин катастрофа — синоним бифуркации, но более эмоционально окрашен.

В математике и физике существует понятие грубости (структурной устойчивости системы): при малом изменении параметра грубая система хоть и изменяет в деталях режим функционирования, но не принципиально. Для грубых систем переход через точку бифуркации означает смену одного структурно устойчивого режима на другой. При этом в точке бифуркации система не является грубой: малое изменение параметра в ту или иную сторону приводит к резким изменениям состояния.

***Грубость динамической системы** - устойчивость структуры разбиения её фазового пространства на траектории по отношению к малым изменениям дифференциальных уравнений. Грубые системы могут быть весьма сложными и в пространстве параметров многомерной динамической системы могут существовать целые области негрубых систем.*

Возникновение диссипативных структур носит пороговый характер. Неравновесная термодинамика связала пороговый характер с неустойчивостью, показав, что новая структура появляется раскрытием неустойчивости в результате флуктуаций. Порядок - продукт флуктуации.

Неустойчивость и пороговый характер самоорганизации связаны с нелинейностью дифференциальных уравнений, описывающих систему. Напомним, что для линейных уравнений существует одно стационарное состояние, для нелинейных — несколько. Поэтому пороговый характер самоорганизации связан с переходом из одного стационарного состояния в другое. Потеря системой устойчивости, есть катастрофа, т.е. скачкообразное изменение, возникающее при плавном изменении внешних условий.

***Самоорганизация** — процесс упорядочения элементов одного уровня в системе за счёт внутренних факторов, без внешнего специфического воздействия (изменение внешних условий может также быть стимулирующим воздействием). Результат — появление единицы следующего качественного уровня.*

В зависимости от того, линейными или нелинейными дифференциальными уравнениями описывается динамическая система, её относят к линейной или нелинейной системе.

Для описания эволюции нелинейных систем во времени основным математическим аппаратом являются нелинейные дифференциальные уравнения. Они задают зависимость скорости изменения каждой переменной от значений самих переменных. Нелинейные уравнения, как правило, не решаются аналитически, поэтому для их исследования используют численные, компьютерные методы. Существует, однако, второй способ описания динамики нелинейных систем: с помощью итерационных уравнений, которые определяют закон изменения переменных в некоторые избранные, дискретные моменты времени. Такие уравнения называют отображениями.

***Отображение** — закон, по которому каждому элементу некоторого заданного множества X ставится в соответствие вполне определённый элемент другого заданного множества Y .*

Проще всего представить себе такой способ описания в ситуации, когда в системе имеется некоторый ритм, например, период внешнего воздействия T . Тогда можно фиксировать дискретные значения переменных точно в соответствии с этим ритмом, т.е. в моменты времени T , $2T$, $3T$ и т.д. Этот способ описания динамики не уступает по общности дифференциальным уравнениям, но гораздо проще для исследования. А. Пуанкаре предложил определённую процедуру, которая сопоставляет динамике в рамках дифференциальных уравнений некоторое отображение (метод сечений Пуанкаре, см. курс лекций И.Н. Бекмана Синергетика).

Линейные дифференциальные и разностные уравнения не приводят к хаосу, а нелинейные - могут приводить. Однако, нелинейность является необходимым, но не достаточным условием существования динамического (детерминированного) хаоса.

Для изучения динамики систем необходимо знать, каким именно образом новые решения уравнений "ответвляются" от известного решения. Ответ на такие вопросы даёт теория бифуркаций (разветвлений), т. е. возникновения нового решения при критическом значении параметра. Момент перехода (катастрофический скачок) зависит от свойств системы и уровня флуктуаций. В реальных условиях при углублении неравновесности в открытой системе возникает определённая последовательность бифуркаций, сопровождающаяся сменой структур. Состояние системы в момент бифуркации является неустойчивым и бесконечно малое воздействие может привести к выбору дальнейшего пути. Финальным состоянием эволюционирующих физических систем является состояние динамического хаоса.

При подходе управляющих параметров к бифуркационным значениям положения равновесия "бифурцируют" (рождаются или умирают). Знание геометрии типичных особенностей позволяет описывать происходящие при этом явления, например, скачкообразный переход системы к далёкому состоянию равновесия при плавном изменении параметров. Такие скачки способны разрушить систему (механическую, упругую, электрическую, биологическую, химическую и т. п.), откуда и название катастрофа. Каскад следующих друг за другом бифуркаций вводит систему в непредсказуемый режим; он ведёт к выбору между двумя решениями, затем четырьмя и т.д.; система начинает колебаться в хаотическом, турбулентном режиме последовательного удвоения возможных значений - впадает в хаос.

Теория катастроф - результат применения топологии к системам, которые обладают четырьмя основными свойствами: бимодальностью, разрывностью, гистерезисом и дивергенцией. В случае

бимодальности для системы характерно одно из двух (или более) состояний, а при разрывности между этими двумя состояниями оказывается сравнительно мало индивидов или наблюдений. Пример как бимодальности, так и разрывности даёт деление организмов на самцов и самок. Наличие случайных организмов неопределенного пола не создаёт препятствий для распознавания этих двух состояний, а теория предполагает такой разрыв между состояниями, что любой индивид может без труда быть отнесен лишь к одной из категорий. О разрывности говорят и тогда, когда малые изменения какой-либо переменной, в том числе времени, вызывают большие изменения в поведении или состоянии. Гистерезис проявляется в том, что система обладает чётко выраженной замедленной реакцией на некое воздействие, причём эта реакция идёт по одному пути, когда воздействие возрастает, и по другому, когда оно убывает. Характерной особенностью дивергенции является то, что близкие начальные условия эволюционируют к значительно удалённым друг от друга конечным состояниям. В приложениях таких моделей к динамике популяций, например, начальные условия чуть выше или чуть ниже вполне определенных порогов, часто расходятся к принципиально разным конечным состояниям.

Поскольку в точках катастроф даже незначительные движения могут повлиять на ход развития, то нужно определить, далеко ли от такой точки находится система. Формально для этого следует изучить зависимость системы от внешних параметров в математических моделях, однако нередко экспериментатор не знает, каким уравнением описывается развитие системы. Тем не менее, даже существуют признаки того, что изучаемая система находится вблизи точки катастрофы (флаги катастроф):

- наличие нескольких различных (устойчивых) состояний;
- существование неустойчивых состояний, из которых система выводится слабыми воздействиями;
- возможность быстрого изменения системы при малых изменениях внешних условий;
- необратимость системы (невозможность вернуться к прежним условиям);
- гистерезис.

1.2 Особенности, каустики, складки и сборки

Теория катастроф, подводит стандартную и эффективную базу под описание качественных изменений в нелинейных уравнениях, описывающих далекие от равновесия системы. Эта катастроф определяет область существования различных структур и границы их устойчивости. Её задачей является получение нормальной формы исследуемого объекта (дифференциального уравнения или отображения) в окрестности «точки катастрофы» и построение на этой основе классификации объектов.

Особенность (сингулярность) — точка, в которой математический объект (обычно функция) не определён или имеет нерегулярное поведение (например, точка, в которой функция имеет разрыв или недифференцируема).

Теория катастроф позволяет свести огромное многообразие сложных ситуаций к небольшому числу точно изученных схем. Математические образы теории катастроф реализуются в волновых полях. Известны геометрические места точек, в которых происходит фокусировка волнового поля, называемые в оптике *каустиками*. При пересечении каустик происходит скачкообразное изменение состояния — меняется число лучей, приходящих в данную точку пространства. Каустики — геометрические места точек, в которых происходит заметная концентрация (фокусировка) волнового поля. С геометрической точки зрения каустики определяются как особенности некоторых отображений, осуществляемых семейством лучей. В каустики скачкообразное изменение состояния при пересечении выражается в изменении числа лучей, приходящих в данную точку пространства.

Каустика - линия или поверхность, вдоль которой концентрируются световые лучи. Это — поверхность, геометрическое место всех фокусов негеоцентрических пучков, т. е. пучков световых лучей, не сходящихся в одной точке. Каустики — это особые точки световых поверхностей, именно потому каустики легко заметить: в них резко возрастает интенсивность светового поля. Каждая точка каустики связана с распределением фронта световой волны; для сферической волны обе каустики сводятся к одной точке - фокусу. Каждая волновая поверхность имеет две каустики, а световые лучи являются касательными к каустикам.

Каустика (жгутич) — огибающая семейства лучей, не сходящихся в одной точке. Каустики в оптике — особые линии (в двухмерном случае) и особые поверхности, вблизи которых резко возрастает интенсивность светового поля. Каустики возникают не только при распространении света, но и в ряде других волновых явлений.

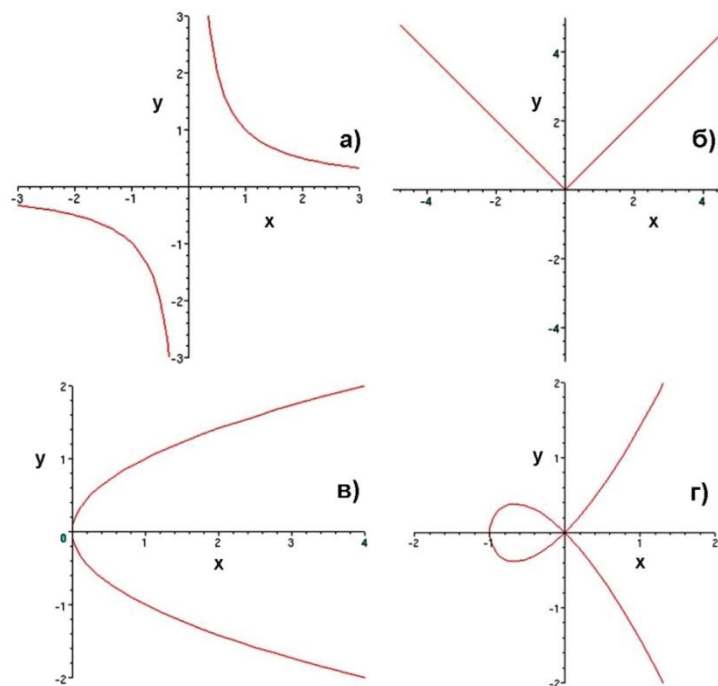


Рис. 3. Особенности в действительном анализе: а - функция $f(x)=1/x$ имеет особую точку в нуле, где она стремится к положительной бесконечности справа и к отрицательной бесконечности — слева; б - функция $g(x)=|x|$ имеет особенность в нуле, где она недифференцируема; в - график, определённый выражением $y^2=x$, имеет в нуле особенность — вертикальную касательную.; г- кривая, заданная уравнением $y^2=x^3+x^2$, имеет в $(0,0)$ особенность — точку самопересечения.

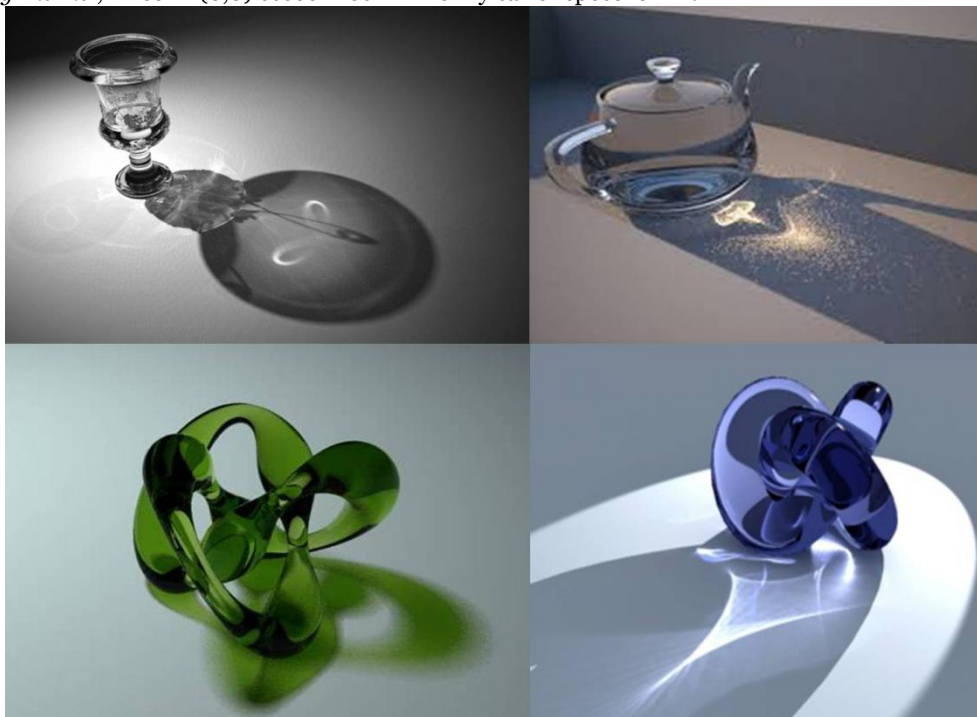
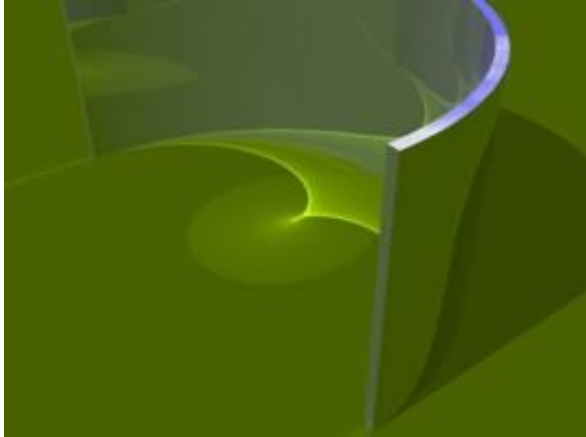


Рис. 4. Каустики в стекле.

Каустика - огибающая семейства лучей, т. е. геометрическое место точек пересечения бесконечно близких лучей семейства. Образование каустики обусловлено криволинейностью волнового фронта (например, фронта отражённой или преломлённой волн), рефракцией лучей в неоднородных средах, анизотропией среды и т. п. Важная роль каустик в волновых задачах определяется тем, что они характеризуют семейство лучей в целом и позволяют составить глобальную качественную картину волнового поля. Каждый световой луч касается каустики, значит, проходит вдоль нее значительную часть своего пути, значит, “отдает” ей большую часть своей энергии. Линия, которая касается каждой прямой из некоторого семейства прямых, называется *огibaющей* этого семейства. Так что каустика является огибающей световых лучей. Можно сказать, что каустика это остов, на который нанизаны все световые лучи.

В приближении геометрической оптики



интенсивность света на каустиках стремится к бесконечности, и потому каустики наблюдаются в виде ярких световых полос и пятен. Здесь каустики представляют собой линии и поверхности бесконечно малой толщины. В геометрическом плане каустика представляет собой эволюту волнового фронта; волновой фронт — эвольвенту каустики.

Рис. 5. Каустика отражения солнечных лучей от цилиндрического зеркала.

Эволюта плоской кривой — множество центров кривизны линии.

По отношению к своей эволюте любая кривая является эвольвентой. Если линии заданы

параметрическими уравнениями, то эволюта имеет уравнение:

$$\begin{aligned} X &= x - y' \frac{x'^2 + y'^2}{x'y'' - x''y'}, \\ Y &= y + x' \frac{x'^2 + y'^2}{x'y'' - x''y'} \end{aligned} \quad (1)$$



Рис. 6. Каустики в воде.



Рис. 7. Каустика разноцветная радуга (катастрофа складки).

Эвольвента плоской линии — это линия, по отношению к которой является эволютой. Иными словами, это кривая, нормаль в каждой точке которой является касательной к исходной кривой. Например, эвольвентой окружности является спиралевидная кривая. Эвольвенту пространственной кривой определяют как ортогональную траекторию касательных этой кривой.

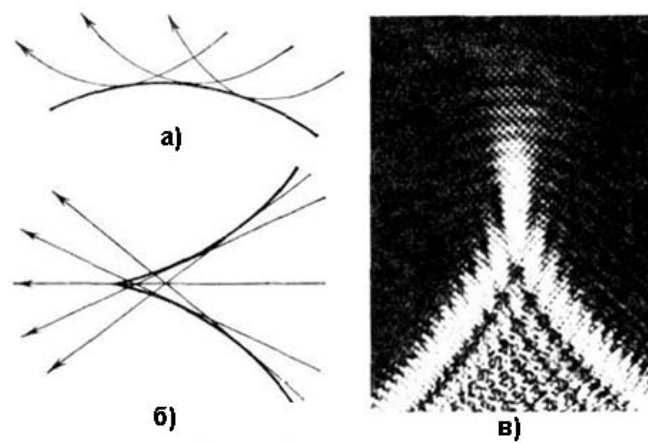


Рис. 8. Примеры каустик: а – простая каустика; б – каустика типа сборки; в – распределение интенсивности поля вблизи такой каустики.



Рис. 9. *D* каустики: отражение параллельных лучей от окружности. Возникающая здесь каустика – яркая линия с острием, расположенным между вершиной и центром зеркала.

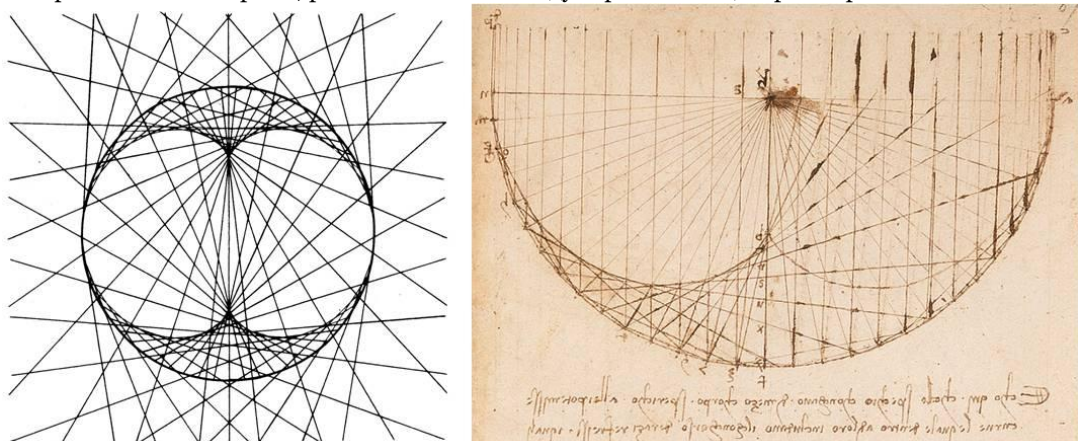


Рис. 10. Каустики: слева – отражение световых лучей от цилиндрического зеркала, справа – рисунок Леонардо да Винчи.

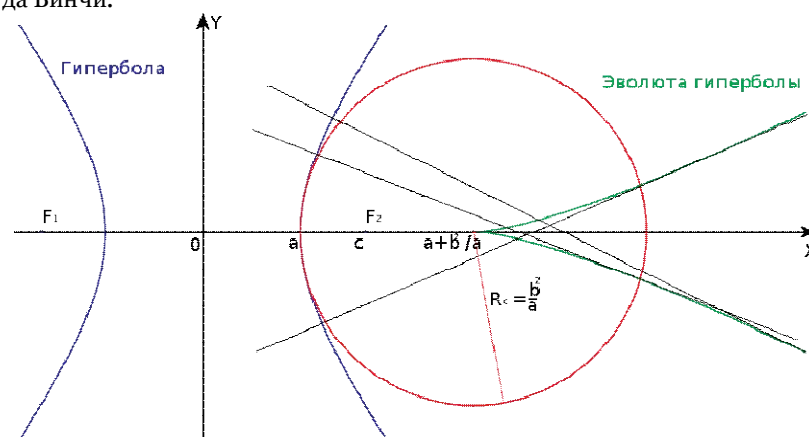


Рис. 11. Синим цветом показана гипербола. Зелёным цветом — эволюта правой ветви этой гиперболы (эволюта левой ветви вне рисунка). Красным цветом показан круг, соответствующий кривизне гиперболы в её вершине.

Эволюта и эвольвента понятия дифференциальной геометрии: множество m центров кривизны плоской кривой l называется эволютой этой кривой; кривая l по отношению к своей эволюте называется эвольвентой (рис.). Эвольвента l кривой m может быть получена как траектория конца B нити AB , которая наматывается на линию m или разматывается с неё (этим построением эвольвенты и объясняется др. её назв. "развёртка"). Эволюта и эвольвента обладают следующими свойствами: 1) касательная CD в произвольной точке C эволюты является нормалью в соответствующей точке D эвольвенты (следовательно, эвольвента есть ортогональная траектория касательных эволюты); 2) всякая ортогональная траектория касательных кривой m является эвольвентой (поэтому у данной кривой бесконечно много эвольвент); 3) разность радиусов кривизны AB и CD в точках B и D эвольвенты равна длине дуги AC эволюты; 4) эволюта является огибающей семейства нормалей эвольвенты.

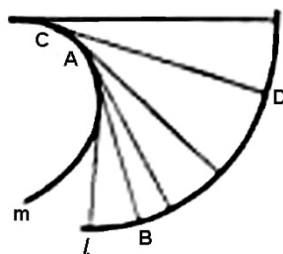


Рис. 12. Эволюта - множество m центров кривизны плоской кривой l ; l - эвольвента кривой m .

Каустики можно рассматривать как особенности отображения (катастрофы), осуществляемого семейством лучей, поэтому последовательная классификация каустик проводится на основе теории катастроф.

Коротко остановимся на роли особенностей в теории катастроф.

Особенности - нарушения гладкости функции при каких-то значениях аргументов. В таких точках значения функции могут изменяться скачкообразно (происходят бифуркации). В простейшем случае особенности гладких отображений представляют собой функции двух переменных $F(x,y)$, которые в трёхмерном пространстве изображаются некоторыми поверхностями над плоскостью XU . Если поверхность образует **складки** так, что перпендикуляры к плоскости XU пересекают ее два или более раза, то функция неоднозначна и может испытывать скачки.

Теория особенностей гладких отображений обобщает исследование экстремумов функций на случай нескольких функций любого числа переменных. **Критическая точка функции** - точка, в которой все первые частные производные равны нулю; критическая точка называется невырожденной, если определитель её матрицы отличен от нуля. У типичной функции все критические точки невырождены.

Гладкие фронты волн при движении в нелинейной среде или при отражении от препятствий образуют **складки**, и при этом возникают сложные пространственные структуры. Число видов таких структур конечно, их можно классифицировать и присвоить каждому из них образное название, например, "ласточкин хвост", "пирамида", "кошелёк" (рис. 13).

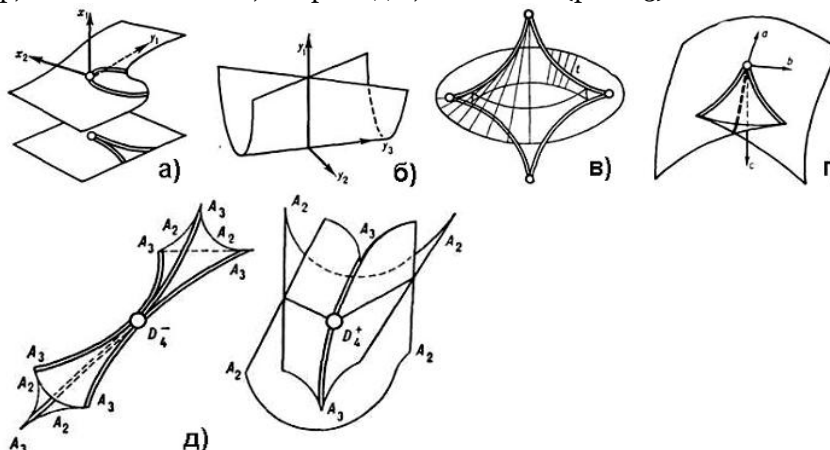
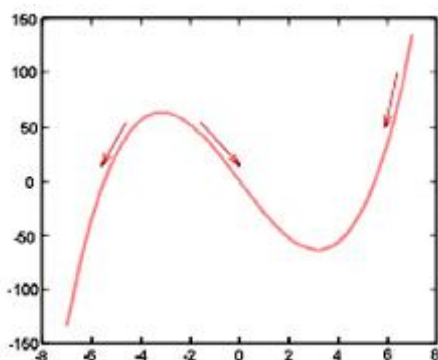


Рис. 13. Примеры бифуркационных диаграмм; а - сборка; б - зонт Уитни-Келли; в - каустика, имеющая 4 точки возврата; г - ласточкин хвост; д - пирамида и кошелёк.



Универсальность геометрии бифуркационных диаграмм позволяет использовать их для одновременного моделирования многих различных по своему физическому смыслу явлений.

Рис. 14. Потенциал в случае существования двух стационарных точек. Стрелками указано направление эволюции системы.

Проиллюстрируем механизм появления складок, сборок и др. геометрических фигур теории катастроф на простейшем примере системы, описываемой одним уравнением первого порядка.

Дана динамическая система

$$\frac{dC}{dt} = f(C) \quad (2)$$

где $f(C)$ - нелинейная функция C .

Здесь $C(t)$ - изменяющаяся во времени целевая функция (концентрация химического реагента, плотность популяции и т.п.); $f(C)$ - потенциальная функция.

При $dC/dt = f(C^*) = 0$ достигается стационарное состояние, при котором концентрация в стационарном состоянии C^* - не зависит от времени.

Пусть далее система немного отклонилась от состояния равновесия C^* и перешла в состояние

$$C = C^* + \xi \quad (\xi < x). \quad (3)$$

Если функция $f(C)$ дифференцируема достаточное количество раз, вблизи C^* , то она допускает разложение в ряд Тейлора:

$$f(C) = f(C^*) + \xi \cdot d(C^*)/dC + \dots \quad (4)$$

Подставив это разложение в исходное уравнение для динамической системы (2), получим для скорости процесса в стационарном состоянии:

$$\frac{d(C^* + \xi)}{dt} = f(C^*) + \xi \frac{dC^*}{dC} + \dots \quad (5)$$

Обозначив $\omega = \frac{dC^*}{dC}$ имеем:

$$\frac{dC^*}{dt} + \frac{d\xi}{dt} = f(C^*) + \omega \xi \quad (6)$$

Ограничившись линейным членом разложения в правой части, получим линейаризованное уравнение:

$$\frac{d\xi}{dt} = \omega \xi \quad (7)$$

решение которого

$$\xi(t) = A_0 e^{\omega t} \quad (8)$$

Если $\omega < 0$, то $\xi(t) = A_0 e^{-L\xi t}$, где $|L| = \omega$. Здесь с течением времени величина C уменьшается и стремится к своему стационарному значению: решение устойчиво. При $\omega > 0$ отклонения от положения равновесия увеличиваются, и имеет место неустойчивое поведение системы. При $\omega = 0$ величина ξ не изменяется со временем.

Таким образом, часто об устойчивости системы можно судить по знаку производной $df(C^*)/dC$ - правой части линейного уравнения - вблизи стационарной точки. Идея использования линейаризованного уравнения принадлежит А.М. Ляпунову.

Замечание. Здесь рассмотрено только линейаризованное решение. Обычно анализ приходится проводить с учётом следующих членов разложения функции $f(C)$, поэтому для утверждения об устойчивости необходим дополнительный анализ.

Поскольку знак производной определяет характер устойчивости системы, то при одних значениях параметров система может быть устойчивой, а при других наступает переход от одного режима к другому, например, от устойчивого характера поведения к неустойчивому. Изменение характера поведения динамической системы на большом временном интервале при изменении значений управляющего параметра называют бифуркацией. Исследование системы начинают с нахождения условий стационарности, а затем анализируют выражение для C^* , как функцию параметров системы или одного какого-то параметра. Полезно нарисовать диаграмму зависимости C^* от этого параметра - бифуркационную диаграмму, которая покажет как изменяется качественный характер поведения системы по полю своих параметров.

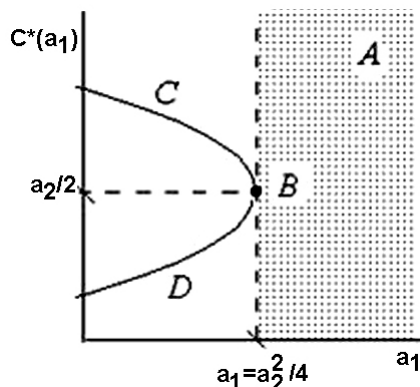


Рис. 15. Зависимость стационарных значений искомой функции (например, концентрации вещества) C^* от управляющего параметра a_1 .

Пусть для определённости потенциал задается полиномом 2-ой степени:

$$f(C) = a_1 - a_2 C + a_3 C^2 \quad (9)$$

причём $a_3 = 1$, так что $f(C) = a_1 - a_2 C + C^2$

В этом случае возможны два стационарных состояния:

$$C_{12}^* = \frac{a_2}{2} \pm \sqrt{\frac{a_2^2}{4} - a_1} \quad (10)$$

В качестве управляющего параметра выберем a_1 . В этом случае бифуркационная диаграмма $C(a_1)$ будет иметь вид параболы (рис. 15).

При $a_1 > a_2^2/4$ стационарных состояний нет (область **A**). При $a_1 = a_2^2/4$ имеется одно состояние, изображаемое точкой **B**. При $a_1 < a_2^2/4$ таких состояний два. Им отвечают две ветви **C** и **D**.

Производная от $f(C^*) = a_1 - a_2 C^* + C^{*2}$:

$$\frac{df(C^*)}{dC} = 2C - a_2 \quad (11)$$

Подставив в это уравнение первое стационарное значение $C = C_1^*$ (со знаком плюс) обнаружим, что производная $df(C_1^*)/dC > 0$, поэтому состояние ветви **C** - неустойчиво: $C(t)$ - уменьшается во времени. Подставив в () при значении $C = C_2^*$ (со знаком минус) обнаружим, что производная $df(C_2^*)/dC$ отрицательна: система на ветви **D** развивается устойчиво и после некоторой флуктуации функция восстанавливает своё значение.

Как уже упоминалось, теория катастроф занимается проблемой устойчивости решений уравнений на поле параметров. В её рамках показано, что если полином $f(C)$ имеет степень по C большую, чем 1, то бифуркационная диаграмма может иметь несколько ветвей. Например, в случае полинома третьей степени (рис.) ветви **A** и **C** — устойчивы, а ветвь **B** неустойчивая. Это означает, что при плавном уменьшении параметра a от больших значений к малым, развитие системы будет идти по ветви **A** до точки **D**.

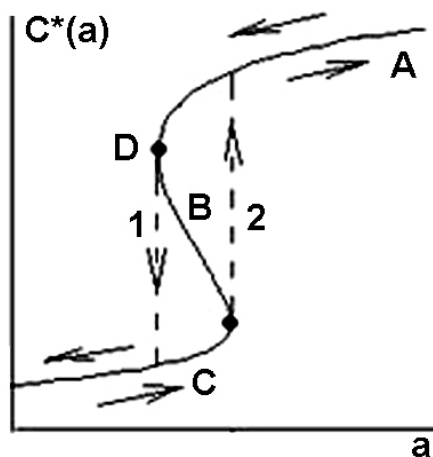


Рис. 16. Зависимость стационарной концентрации от параметра a .

Описание системы, претерпевающей бифуркации включает и детерминистический и вероятностные элементы, так как в окрестности точек бифуркации существенную роль играют флуктуации и именно они «выбирают» ветвь, которой далее будет следовать система. Для этих систем нельзя точно указать ход их эволюции — можно лишь предсказать вероятность возможных сценариев развития.

Если система управляется двумя параметрами, то возможны только два типа катастроф (рис.): «складка» (*fold*) и «сборка» (*cusp*). Катастрофа первого типа — «складка» — характерна для триггерных систем. В катастрофе «сборка» есть как траектории без перескока, с плавным развитием, так и со скачком в развитии. Возможны и другие типы, но они легко нарушаются при незначительных шевелениях поверхности или направлениях проектирования на плоскость.

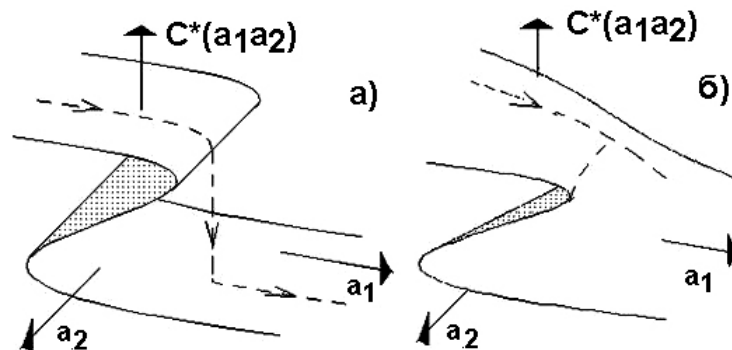


Рис. 17. Два вида катастроф: а - складка; б - сборка.

Особенность типа складки (сборки) функции состояния приводит к «катастрофе». Гладкость этой поверхности не гарантирует, что при плавном изменении одной переменной, две другие тоже меняются плавно. В самом деле, лыжник, подъезжающий к обрыву, движется по достаточно гладкой поверхности, и одна из его пространственных координат изменяется

достаточно гладко. Тем не менее, за обрывом одна из оставшихся координат должна измениться скачком — иначе лыжник оторвется от поверхности. Нечто подобное происходит и с водяным паром при охлаждении. В какой-то момент давление при фиксированном объёме не может больше меняться плавно, и падает скачком; происходит «катастрофа».

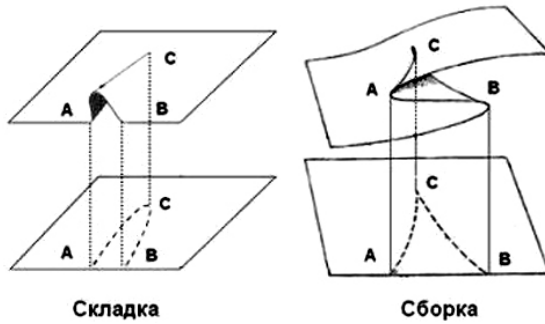


Рис. 18. Особенности гладких изображений Уитни.

Перейдём теперь к потенциалу, описываемому кубическим полиномом. Пусть, например, связь двух переменных величин имеет

вид (потенциал):

$$f(C) = aC - \frac{C^3}{3}, \quad (12)$$

где $f(C)$ и C – переменные; a – параметр; множитель $1/3$ в первое слагаемое введён для упрощения преобразований.

Производная () имеет вид:

$$\frac{df}{dC} = a - C^2. \quad (13)$$

Уравнение (12) имеет два стационарных состояния: $C_{1,2}^* = \pm\sqrt{a}$. Линеаризуя (13) в окрестности стационарного состояния, найдём собственные значения $L = \pm 2\sqrt{a}$.

Поведение функция (12) определяется величиной параметра a . Если этот параметр положителен, то функция носит монотонный характер, её график – плавная монотонно возрастающая во времени кривая. Если параметр a уменьшается, то при нулевом его значении тип функции меняется. При нулевом значении параметра изменяется характер связи в системе и поведение системы (бифуркация). При отрицательной величине параметра a , функция, описываемая уравнением (12) представляет собой немонотонную функцию. Она имеет максимум и минимум при значениях $C = \pm\sqrt{a}$, т.е. связь между переменными в определенной окрестности начала координат не однозначна: одному значению переменной $f(C)$ соответствует три разных по величине значения переменной C . Здесь при монотонном плавном изменении переменной $f(C)$ переменная a изменяется скачкообразно. Это и есть катастрофа.

Таким образом, C_1^* – устойчивое состояние, C_2^* – неустойчивое. При $a=0$ имеем $C_1^*=C_2^*=0$: и собственное значение в этой точке равно нулю. Бифуркация имеет коразмерность 1, так как выделяется одним условием $L(a)=0$. В области $a<0$ все кривые подобны и имеют две критические точки; при $a>0$ – кривые также подобны, но критических точек нет; точка $a=0$ равная нулю, в пространстве управляющих параметров является *сепаратрисой*.

Сепаратриса - траектория динамической системы с двумерным фазовым пространством, стремящаяся к седловому состоянию равновесия при времени $t \rightarrow \infty$ (устойчивая сепаратриса) или при $t \rightarrow -\infty$ (неустойчивая сепаратриса).

На рис. 19 изображена фазопараметрическая диаграмма системы (). Если бифуркация седло-узел происходит в двухпараметрической системе, то в фазопараметрическом пространстве ей соответствует особенность (катастрофа) типа складки вдоль линии l на плоскости параметров.

Замечание Для оценки «сложности» бифуркации вводится понятие «коразмерности». Коразмерность k совпадает с числом параметров, при независимой вариации которых эта бифуркация происходит. В системе происходит бифуркация коразмерности k (*codim k dimension – размерность*), если в ней выполняются k условий типа равенств. Значение $k=0$ соответствует отсутствию бифуркации в данной точке.

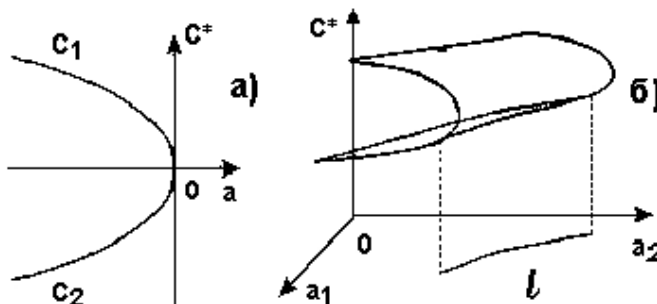


Рис. 19. Фазометрическая диаграмма бифуркации седло-узел: а - с одним управляющим параметром. При $a>0$ в системе нет устойчивых равновесий, при $a<0$ в системе два равновесия, устойчивое и неустойчивое; б - бифуркации седло-узел с двумя управляющими параметрами (катастрофа типа складка). l - линия бифуркации на плоскости параметров a_1a_2 .

Если установлено, что между переменными, характеризующими поведение системы, связь описывается уравнением вида (12), то можно утверждать, что в системе возможно проявление неустойчивости. Если параметр a положителен, но выявлена тенденция его уменьшения, то можно считать, что система приближается к катастрофе. Следует продолжить изучение системы и выявить условия или возможные сроки наступления катастрофы, оценить ее вероятные последствия. Тип элементарной катастрофы, определяемой связью, которая описывается уравнением (12), носит название катастрофы складки, поскольку в пространстве трех координат – двух переменных и параметра a – поверхность, описываемая уравнением, имеет вид складки, начинающейся при $a = 0$ и углубляющейся по мере дальнейшего уменьшения параметра.

Предсказать появление элементарных катастроф можно путём оценки возможности описания связей в системах уравнениями типа уравнений элементарных катастроф (12). На практике это может быть реализовано, если можно получить регрессионные уравнения связей в системах. Если по уравнению детерминации, уровню значимости регрессионное уравнение одной из катастроф превосходит регрессионное уравнение связи устойчивого характера, то следует считать катастрофу возможной и дать ее прогноз. *Флаги катастроф* представляют собой косвенные признаки, по которым можно судить о возможности наличия катастрофы в системе. Например, для экономических систем существует один флаг – *аномальная дисперсия*. Признаком всевозможного приближения катастрофы является нарастание дисперсии или размахов величин, характеризующих систему. Этот признак реализуется при статистическом регулировании качества продукции в серийном производстве.

1.3 Элементарные катастрофы

Теория катастроф анализирует критические точки потенциальной функции, т. е. точки, где не только первая производная функции равна нулю, но и равны нулю же производные более высокого порядка.

Критическая точка — точка, где производная равна нулю, либо неопределена.

Динамику развития критических точек изучают при помощи разложения потенциальной функции в рядах Тейлора посредством малых изменений входных параметров. Если точки роста складываются не просто в случайный узор, но формируют структурированную область стабильности, эти точки существуют как организующие центры для особых геометрических структур с низким уровнем катастрофичности, с высоким уровнем катастрофичности в окружающих их областях фазового пространства. Если потенциальная функция зависит от 3 или меньшего числа активных переменных (обычно одна-две), и 5 управляющих параметров (не более пяти), то в этом случае существует всего 7 обобщённых структур описанных геометрий бифуркаций, которые можно разложить в ряды Тейлора при помощи диффеоморфизма (гладкой трансформации, обращение которой также гладко). Эти семь элементарных типов катастроф известны под именами, которые им дал Рене Том: складка, сборка, ласточкин хвост, бабочка, гиперболическая омбилика, эллиптическая и параболическая омбилика. Все 7 канонических катастроф имеют свои образы в каустиках.

Омбилика - точка округления (круговая точка), тип точек поверхности в дифференциальной геометрии; тип особенностей функций (катастроф) в теории катастроф.

Для описания событий, происходящих вблизи бифуркационной границы удобно использовать системы самых простых уравнений, обычно – полиномиальных, которые описывают качественные особенности процесса. Такие системы называются *модельными* и активно используются в теории бифуркаций и в теории катастроф. Например, для системы, которая может быть описана одним автономным дифференциальным уравнением, модельная система имеет вид:

$$\frac{dC}{dt} = aC + F(C) \quad (14)$$

т.е. потенциал $f(C) = aC + F(C)$.

Условием вырождения (бифуркации) является $a=0$, т.е. отсутствие в правой части линейного члена. При нулевых значениях параметров в системе возникает вырождение, а при вариации параметров происходит бифуркация.

Рассмотрим основные свойства фундаментальных типов катастроф.

Начнём с потенциальные функции, имеющей одну активную переменную.

1. Катастрофа типа складка определяется потенциальной функцией имеет вид

$$f(C) = C^3 + aC \quad (15)$$

Замечание. Выше мы рассмотрели аналогичную функцию $f(C, a) = \frac{C^3}{3} + aC$. Иногда предпочитают иллюстрировать образование складки уравнением $f(C, b) = -C^3 + C - b$. Принципиально это дело не меняет: важно, чтобы C было в кубе (многочлен в потенциале третьей степени).

При отрицательных значениях параметра a , потенциальная функция U имеет два экстремума — один стабильный (устойчивое равновесие) и один нестабильный (неустойчивое равновесие). Если параметр a медленно изменяется, система может находиться в точке стабильного минимума. Но при $a = 0$, стабильные и нестабильные экстремумы встречаются и аннигилируют. Это — точка бифуркации. При $a > 0$ не существует стабильного решения. Если физическая система проходит через точку бифуркации типа «свёртка», и поэтому параметр a достигает значения 0, стабильность решения при $a < 0$ внезапно теряется, и система может осуществить внезапный переход в новое, весьма отличное от предыдущего состояние.

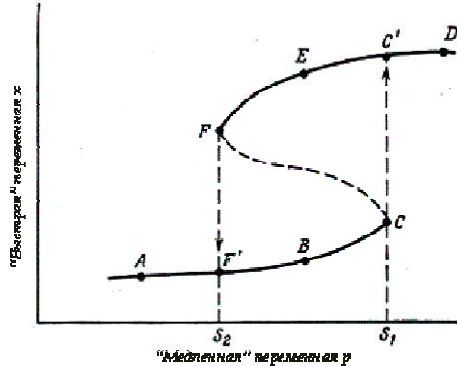


Рис. 20. Катастрофа типа складки.

Простая катастрофа «складка» хорошо иллюстрирует свойство бимодальности, представленное двумя ветвями складчатого многообразия, и свойство разрывности, представленное резкими скачками с одной ветви на другую, в особенностях S_1 и S_2 . Гистерезис иллюстрируется тем, что траектория системы при уменьшении b после пересечения особенности отличается от траектории, по которой движется система при увеличении b . Следует пожалуй отметить, что конкретная форма функции $C(a)$ на

многообразии, не важна — лишь бы в проекциях C на b сохранялась особенность типа складки.

В катастрофе типа складка система сначала находится в точке A на нижней ветви складчатого многообразия. С ростом переменной b переменная C тоже возрастает, так что система переходит через точку B и достигает точки C . В данной точке переменная b пересекает особенность S_1 , и система совершает «катастрофический» скачок на верхнюю ветвь многообразия в точку C' . Дальнейшее возрастание переменной b уводит систему далее за точку D . Если же переменная b начинает убывать, то система продолжает следовать вдоль верхней ветви многообразия через точку E к точке F . В этой точке переменная b пересекает особенность S_2 , и система совершает «катастрофический» возврат на нижнюю ветвь многообразия в точку F' , после чего дальнейшие

изменения переменной b ведут систему либо к точке A , либо к точке B до тех пор, пока она вновь не пересечет особенность S_1 .

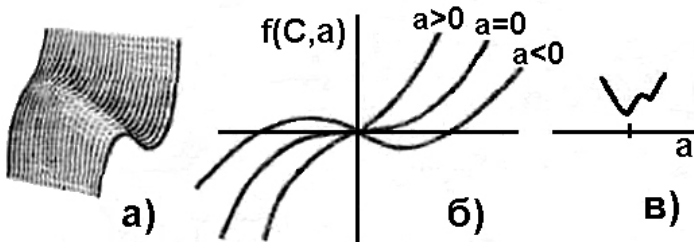


Рис. 21. Катастрофа складки: а — поверхность катастрофы; б — зависимость функции катастрофы от переменной состояния; в — сепаратриса.

При $a > 0$ все кривые качественно подобны — они не имеют критических точек. Все кривые с $a < 0$ также подобны и имеют две критические точки (рис. 21б). Точка $a = 0$ в пространстве управляющих параметров является сепаратрисой (рис. 21в).

Катастрофа типа «складки» появляется в моделях, описывающих релаксационные колебания, «ждущие» режимы и триггерные системы (параметрическое переключение). Модели, имеющие «складки», используются при описании автоволновых процессов и диссипативных структур, в моделях нагруженных арок, диссипативных структур, моделях релаксации.

2. Катастрофа типа сборки - трёхкратное равновесие. Бифуркация имеет коразмерность 2 и требует для своего описания как минимум двух параметров. Потенциальная функция - полином 4-ой степени:

$$f(C) = C^4 + aC^2 + bC \quad (16)$$

Производная от потенциала:

$$\frac{df}{dC} = 4C^3 + 2aC + b \quad (17)$$

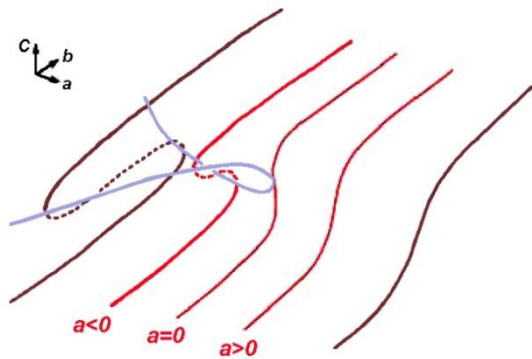


Рис. 22. Форма сборки в пространстве параметров (a, b) вблизи точки катастрофы, показывающая бифуркацию, разделяющую области с одним и двумя устойчивыми решениями.

Замечание. Для простоты анализа форму потенциала часто выбирают в виде: $f(C,a,b) = (1/4)C^4 + (1/2)aC^2 + bC$, производная которой $\frac{df(C)}{dC} = C^3 + aC + b$ что на последующих рассуждениях не сказывается.

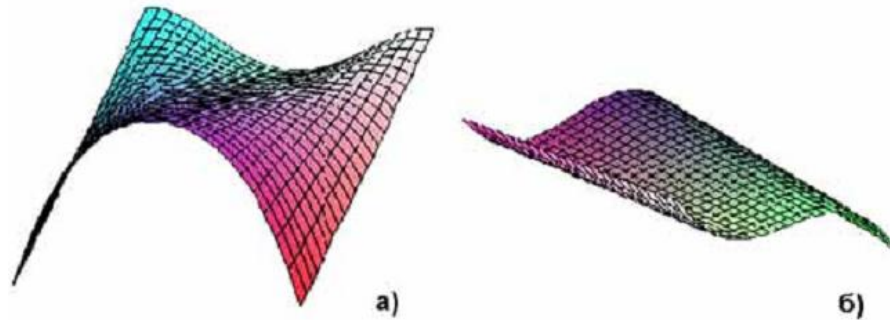


Рис. 23. Графики функций $f(x;a,b) = x^4 + ax + b$ и $f(x;a,b) = x^3 + ax + b = 0$.

Функция катастрофы сборки зависит от одной переменной состояния, C , и двух управляющих параметров: a и b . Сепаратриса сборки разделяет плоскость управляющих параметров на две области с одной и тремя критическими точками, ее линии имеют дважды вырожденные точки, а точка пересечения вырождена трижды. Потенциальные функции соответствуют некоторым точкам плоскости управляющих параметров.

На рис. 22 представлена диаграмма катастрофы сборки, показывающая кривые (коричневые и красные) для C , удовлетворяющего уравнению $df(C)/dC = 0$ и параметров (a,b) , где параметр b изменяется непрерывно, а для параметра a показаны только несколько разных значений. За пределами сборки (синяя линия) каждой точке (a,b) в пространстве параметров соответствует только одно решение C . Внутри же сборки существуют по два различных значения C , соответствующих локальным минимумам $f(C)$ для каждой точки (a,b) , разделённые значением C , соответствующим локальному максимуму.

В трёхмерном виде сборка изображена на рис. 24. Здесь снова предполагается, что система описывается переменной C , которая зависит от двух переменных a и b . Благодаря наличию складки на поверхности, изображающей эту зависимость, поведение системы варьирует в соответствии со значениями a и b . Например, при изменении a от точки a_1 к a_2 система движется из точки A , пока не встретится с особенностью и не совершит «катастрофический» скачок на нижнюю часть поверхности, вдоль которой будет продолжать двигаться к точке B . С другой стороны, при движении системы от C к D то же самое изменение значений a не встречается с особенностью. Происходит или нет встреча с особенностью, зависит от относительных значений a и b .

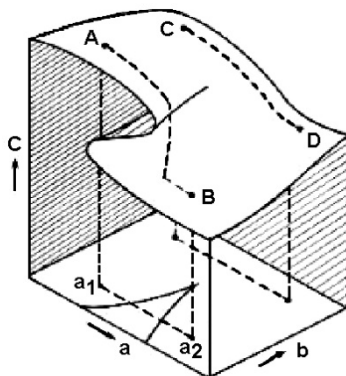


Рис. 24. Изображение катастрофы «сборка».

Диаграмма катастрофы «сборка» с точкой возврата, на которой показаны кривые (коричневые, красные) по переменной C , удовлетворяющие выражению для параметров (a, b) , кривые показаны для непрерывно изменяющегося параметра b при различных значениях параметра a . Вне геометрического места точек возврата (синяя область) для каждой точки (a, b) в фазовом пространстве существует только одно экстремальное значение переменной C . Внутри точек возврата существует два различных значения C , которые дают локальные минимумы функции $f(C)$ для каждой пары (a, b) . При этом указанные значения разделены локальным максимумом.

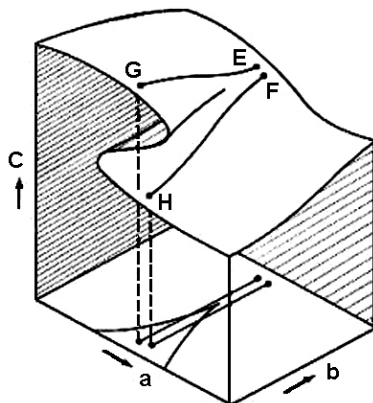


Рис. 25. Иллюстрация дивергенции при сборке.

Катастрофа «сборка» хорошо иллюстрирует свойство дивергенции. На рис. 24 показаны траектории системы из двух близких состояний E и F . Если значение b уменьшается, система движется к точкам G и H соответственно. При одном и том же изменении параметра b и даже при том, что обе траектории могут

начинаться из сколь угодно близких точек, они приводят систему в весьма далекие друг от друга конечные состояния. Благодаря наличию складки, траектории из двух этих близких точек расходятся, причём траектория EG оказывается на верхнем, а траектория FH – на нижнем листе многообразия.

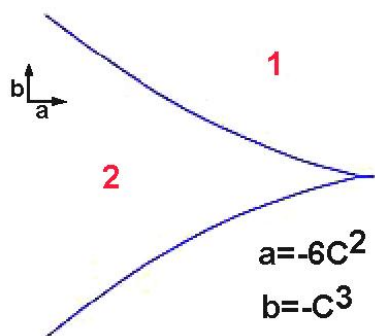


Рис. 26. Форма сборки в пространстве параметров (a, b) вблизи точки катастрофы, показывающая бифуркацию, разделяющую области с одним и двумя устойчивыми решениями.

При $a=0$ на пространстве $b=0$ имеет место бифуркация типа «вилка». Форма точек возврата в фазовом пространстве (a, b) около точки катастрофы, показывающая геометрическое место бифуркаций типа «свёртка», которое разделяет область с двумя стабильными решениями и область с одним решением. Геометрия точек возврата обычна для бифуркации типа «свёртка» при добавлении в управляющее пространство нового параметра b . Изменяя параметры, можно найти, что имеется кривая (синяя) точек в пространстве (a, b) , на которой теряется стабильность, то есть на этой кривой стабильное решение может внезапно «перепрыгнуть» на альтернативное значение (также стабильное). Но в геометрии точек возврата кривая бифуркаций заворачивает назад, создавая вторую ветвь, на которой уже это второе решение теряет стабильность, а потому может совершить «прыжок» назад на исходное множество решений. При повторном увеличении значения параметра b и последующем уменьшении его, можно наблюдать гистерезис в поведении петель, поскольку система следует по одному решению, «перепрыгивает» на другое, следует по нему и «перепрыгивает» назад на исходное. Однако это возможно только в области в параметрическом пространстве при $a < 0$. Если значение параметра a увеличивается, петли гистерезиса становятся меньше и меньше, пока значение a не достигнет 0. В этой точке петли исчезают (катастрофа с точкой возврата), и появляется только одно стабильное решение.

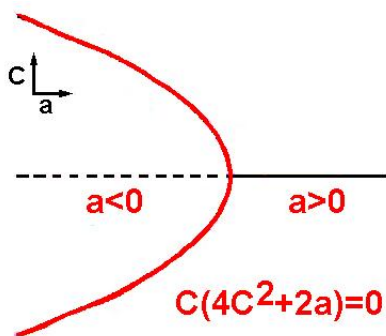


Рис. 27. Бифуркация типа вилы при $a=0$ на поверхности $b=0$.

Можно рассмотреть процесс изменения параметра a при неизменном значении b . В симметричном случае при $b=0$ можно наблюдать бифуркацию типа «вилы» при уменьшающемся значении параметра a одно стабильное решение внезапно разделяется на два стабильных решения и одно неустойчивое. В это время физическая система проходит в область $a < 0$ через точку возврата ($a=0, b=0$) (это — пример спонтанного нарушения симметрии). Вдали от точки возврата не существует внезапных изменений в физической системе, поскольку при прохождении по кривой бифуркации свёртки происходит только то, что становится доступным второе альтернативное решение.

Бифуркация состоит в слиянии трех состояний равновесия – узлов Q_1, Q_2 и седла Q_0 между ними (рис. 6.8). Система имеет три особых точки. Линейный анализ показывает, что при $a > 0$ и любом b система имеет единственное состояние равновесия Q_0 с отрицательным собственным значением, то есть асимптотически устойчивое. При $a < 0$ существует область значений b (заштрихованная область на бифуркационной диаграмме (рис. 6.8a), где система имеет три состояния равновесия Q_1, Q_2 и Q_0 , причём Q_0 – неустойчивое состояние равновесия, а Q_1, Q_2 – устойчивые. Границы области бистабильности образованы линиями l_1 и l_2 , соответствующими бифуркациям седло-узел, на которых два из состояний равновесия сливаются и исчезают. Линии l_1 и l_2 сходятся в точке A ($a=b=0$). Для уравнения () в точке A фазовый портрет представляет собой седло. В фазопараметрическом пространстве (рис. 6.8б) имеет место структура, называемая сборкой. Верхний и нижний лист сборки соответствуют устойчивым состояниям равновесия, а средний – неустойчивому. На ребрах сборки имеют место катастрофы типа складки.

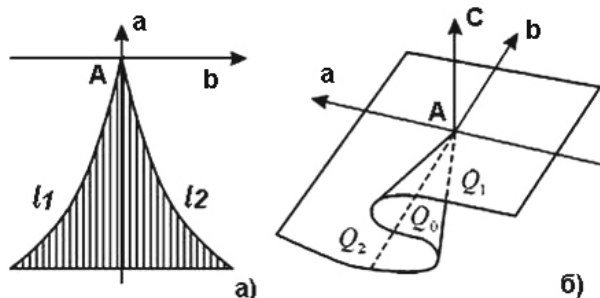


Рис. 28. Бифуркация трехкратного равновесия (катастрофа – сборка): a – бифуркационная диаграмма, b – фазопараметрическая диаграмма.

Замечание. Важное различие катастроф типа складки и сборки состоит в том, что складка не описывает поведение системы на больших временах. Изображающая точка уходит из

рассматриваемой области фазового пространства, где справедлива формула (6.18). Катастрофа складка не локализуема.

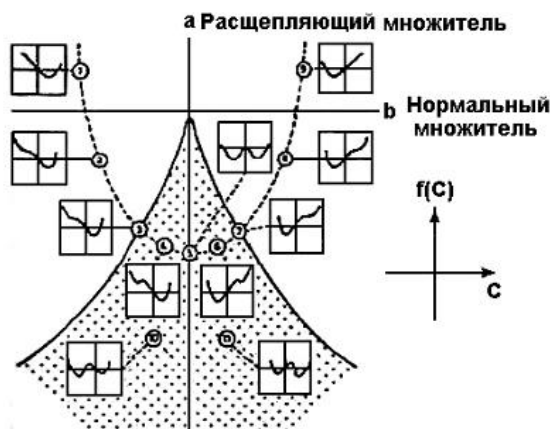


Рис. 29. Катастрофа сборки: Плоскость управляющих параметров.

На рис. 28 показана сепаратриса катастрофы сборки. Она разделяет плоскость управляющих параметров на две открытые области, представляющие функции с одной и тремя критическими точками. Линии сепаратрисы имеют дважды вырожденные точки, а точка пересечения — трижды вырождена. На рис. 29 изображены также потенциальные функции, соответствующие некоторым точкам плоскости управляющих параметров.

Вне сборки есть только один корень, и он всегда отвечает минимуму потенциала $f(C, a)$. Внутри области есть три действительных корня: один из них соответствует максимуму (неустойчивое состояние), и два — минимуму, что можно проверить, исследуя вторую производную функции f . Заштрихованная область на рис. является **областью катастроф**, а граница — бифуркационное множество, где локальный минимум исчезает. Как это происходит, можно увидеть на рис. 1, где в точках 3 и 7 на границе области исчезающие минимумы функции сливаются, образуя точку перегиба. Ось a_1 (при $a_1 < 0$ является конфликтной множеством, где существуют два минимума равной глубины. В случае сборки параметр a_1 носит название «расщепляя множителя», а a_2 — «нормального множителя». Основанием для выбора такого наименования является то обстоятельство, что именно величина a_1 определяет, траектория будет лежать в области складки поверхности: если $a_1 > 0$ поверхность однозначна, тогда как в случае $a_1 < 0$ она двусмысленна: с изменением же параметра a_2 переменная C меняется монотонно и непрерывно, за исключением прыжков в точках бифуркации.

Рис. 30. Управляющее многообразие сборки.



Модели, содержащие катастрофу типа сборки, используются в механике конструкций, при описании ряда колебательных режимов, в динамике квантовых систем. Модели с функцией сборки встречаются в механике конструкций, при описании многих колебательных режимов, в динамике квантовых систем. Они используются при изучении релаксационных автоколебаний малой амплитуды, колебательных режимов со смещением средней точки и диссипативных структур ступенчатого типа. Триггерные системы применяются для описания бистабильных режимов.

3. Катастрофа типа «Ласточкин хвост»

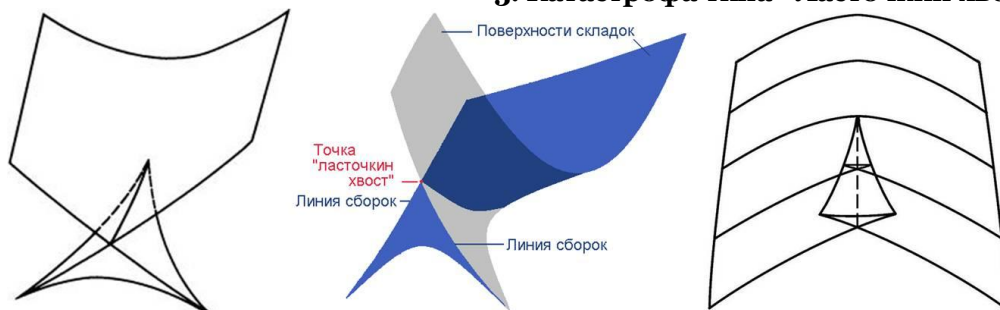


Рис. 31. Поверхность катастрофы "Ласточкин хвост".

Слияние четырех особых точек приводит к катастрофе типа «ласточкин хвост» (рис. 29) и «бабочка». Фазовое пространство при этом четырёхмерное. Потенциал задаётся полиномом:

$$f(C) = C^5 + aC^3 + bC^2 + cC \quad (18)$$

Критические точки определяются через приравненные к нулю производные: Критические точки: $5C^4 + a + 2bC + 3C^2c = 0$. 1. Дважды вырожденные: $10C^3 + b + 3C^2c = 0$. 2.

Трижды вырожденные: $10C_2+1=0$. 3. Четырежды вырожденные: $C=0$. Функция $f(C;0,0,0)$ имеет четырежды выраженную точку $C=0$.

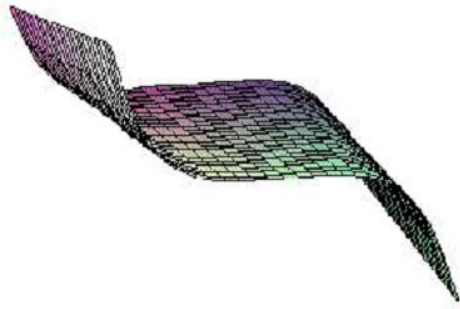


Рис. 32. График функции $f(x; a, b, c) = x^5 + ax^2 + bx^3 + cx^3$.

Управляющее пространство в данном типе катастроф является трёхмерным. Каскад бифуркаций в фазовом пространстве состоит из трёх поверхностей бифуркаций типа «свёртки», которые встречаются на двух кривых бифуркаций с точками возврата, которые в конечном итоге встречаются в одной точке, представляющей собой бифуркацию типа «ласточкин хвост». По мере прохождения значений параметров по поверхностям областей бифуркаций типа «свёртка» пропадает один минимум и один максимум потенциальной функции. В области бифуркаций с точкой возврата два минимума и один максимум замещаются одним минимумом; за ними бифуркации типа «свёртка» исчезают. В точке ласточкиного хвоста два минимума и два максимума встречаются в одном значении переменной C . Для значений $a > 0$ за ласточкиным хвостом существует либо одна пара (минимум, максимум), либо не существует вообще никаких бифуркаций. Это зависит от значений параметров b и c . Две поверхности бифуркаций типа «свёртка» и две линии бифуркаций с точками возврата встречаются при $a < 0$, а потому исчезают в самой точке ласточкиного хвоста, заменяясь одной поверхностью бифуркаций типа «свёртка».

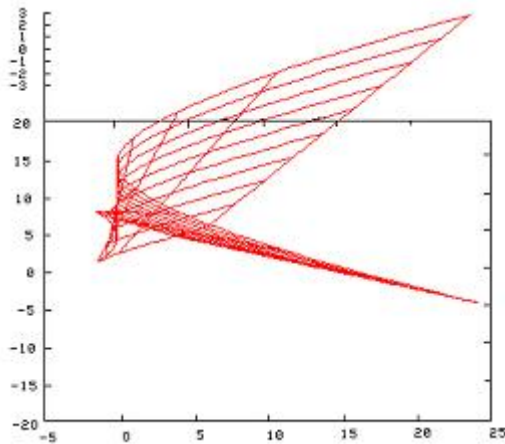


Рис. 33. Катастрофа ласточкин хвост.

4. Катастрофа типа «Бабочка»

$$f(C) = C^6 + aC^4 + bC^3 + cC^2 + dC \quad (19)$$

В зависимости от значений параметров потенциальная функция может иметь три, два или один локальный минимум, причём все минимумы разделены областями с бифуркациями типа «свёртка». В точке с названием «бабочка» встречаются три различные пространства (трёхмерных плоскости) таких бифуркаций типа «свёртка», две поверхности бифуркаций с точками возврата и кривая бифуркаций типа «ласточкин хвост». Все эти бифуркации пропадают в одной точке и преобразуются в простую структуру с точкой возврата тогда, когда значение параметра a становится положительным.

Перейдём теперь к потенциальным функциям с двумя активными переменными. Омбилические катастрофы являются примерами катастроф второго порядка. Они, например, наблюдаются в оптике при отражении света от трёхмерных поверхностей. Сами по себе такие катастрофы тесно связаны с геометрией почти сферических поверхностей. Рене Том предложил рассматривать гиперболическую омбилическую катастрофу как разрушение волны, а эллиптическую омбилическую катастрофу — как процесс создания структур, похожих на волосной покров.

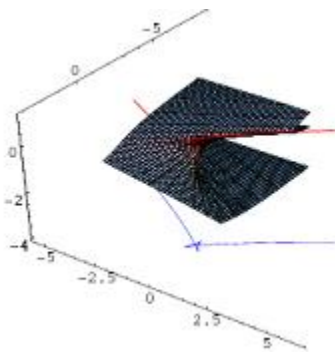


Рис. 34. Катастрофа бабочка

Омбилика (омбилическая точка) — локально сферическая точка на трёхмерной поверхности. В таких точках обе главных кривизны равны, и каждый вектор касательной является основным направлением. Омбилические точки обычно появляются в виде изолированных точек в эллиптических областях поверхности, то есть таких, где гауссова кривизна положительна. Сфера является единственной поверхностью, на которой каждая точка является омбиликой.

гауссова кривизна положительна. Сфера является единственной поверхностью, на которой каждая точка является омбиликой.

5. Гиперболическая омбилика

$$f(C_1, C_2) = C_1^3 + C_2^3 + aC_1C_2 + bC_1 + cC_2.$$

6. Эллиптическая омбилика

$$f(C_1, C_2) = C_1^3/3 - C_1C_2^2 + a(C_1^2 + C_2^2) + bC_1 + cC_2.$$

7. Параболическая омбилика

$$f(C_1, C_2) = C_1^3 C_2 + C_2^4 + a C_1^2 + b C_2^2 + c C_1 + d C_2.$$

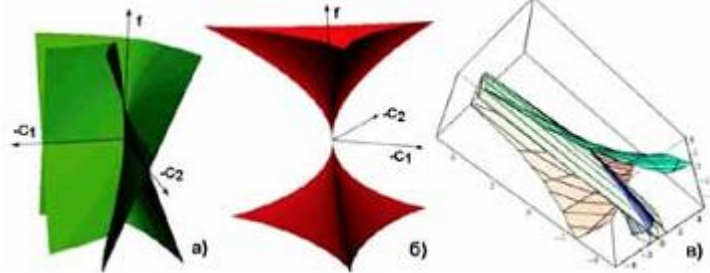


Рис. 35. Катастрофы типа омбилика: а - гиперболическая омбилика; б - эллиптическая омбилика; в - параболическая омбилика.

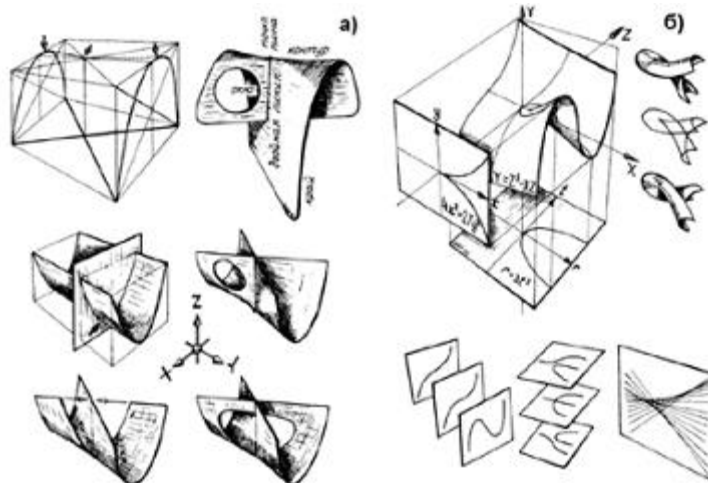


Рис. 36. а - зонтик Уитни; б - сборка Кэли.

Катастрофу **зонтик Уитни-Кэли** назвали так потому, что уравнению, задающему поверхность, удовлетворяет и отрицательная часть оси f - своего рода ручка зонтика.

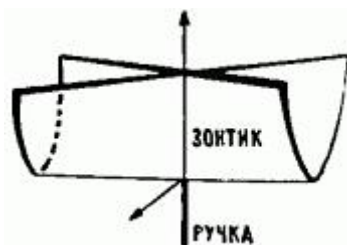


Рис. 37. Зонтик Уинтли-Кэли.

Лекция 2. ПРИМЕРЫ ТЕОРИИ КАТАСТРОФ

Теория особенностей дифференцируемых отображений, получившая широкую известность под эффектным названием "теория катастроф", нашла применение в механике конструкций, метеорологии, аэро- и гидродинамике, оптике, теории кооперативных явлений, квантовой динамике, устойчивости кораблей, эмбриологии, социологии, лингвистике, экспериментальной психологии, экономике, геологии, теории элементарных частиц, а также в исследовании биений сердца, моделировании деятельности мозга, психических расстройств и т. п. Эта теория используется в исследовании возбуждения нервного волокна, перехода ламинарного течения в турбулентное, потери человеком самообладания, превращения жидкости в пар, деления биологических клеток, краха биржи и т.д. Теория катастроф подводит стандартную базу под описание качественных изменений в нелинейных уравнениях, моделирующих системы, далекие от равновесия. Она является основой анализа в теории бифуркаций, в теории переходов термодинамических систем в новые структурные состояния. В данной лекции мы опишем некоторые простые устройства, наглядно демонстрирующие эффект "катастрофы", и проиллюстрируем некоторые возможные направления применения теории катастроф. Строгий анализ практически важных ситуаций будет дан в последующих лекциях. Там же будут рассмотрены другие важные применения катастроф (аэродинамика, квантовая механика, лазерная физика, турбулентность и др.), которые оказались за рамками этой лекции.

Для прояснения некоторых деталей курса полезно ознакомиться с комиксом ["Тайны катастрофы" И.Стьюарта](#).

2.1 Иллюстрации теории катастроф

Некоторые аспекты теории катастроф можно иллюстрировать практически важными примерами. В данной лекции мы будем ориентироваться на элементарные катастрофы Тома, классификация которых представлена в табл.1 и 2.

Как уже упоминалось, различия в начальных условиях рожают огромную разницу конечных явлений, так что предсказание будущего становится невозможным; неожиданно возникающие свойства и поведение системы не могут быть поняты путём исследования её частей, при последовательных бифуркациях эволюция системы необратима и т.п. Необратимые процессы в открытой системе переводят её в хаос (как и в закрытой системе, в которой энтропия всегда растёт). В открытой системе, в отличие от закрытой, возможно возникновение новой системы с высоким уровнем организации, например, диссипативной структуры (бифуркация уменьшает энтропию - процесс, возможный только в открытой системе). Таким образом, система может претерпевать превращения: порядок I \rightarrow беспорядок \rightarrow порядок II).

Табл.1. Элементарные катастрофы Тома.

Тип катастрофы	k	Росток	Возмущение
A_2	1	x^3	$a_1 x$
$A_{\pm 3}$	2	$\pm x^4$	$a_1 x + a_2 x^2$
A_4	3	x^5	$a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3$
$A_{\pm 5}$	4	$\pm x^6$	$a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4$
A_6	5	x^7	$a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 + a_5 x^5$
D_{-4}	3	$x^2 y - y^3$	$a_1 x + a_2 y + a_3 y^2$
D_{+4}	3	$x^2 y + y^3$	$a_1 x + a_2 y + a_3 y^2$
D_5	4	$x^2 y + y^4$	$a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 y^2$
D_{-6}	5	$x^2 y - y^5$	$a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 y^2 + a_5 y^3$
D_{+6}	5	$x^2 y + y^5$	$a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 y^2 + a_5 y^3$
$E_{\pm 6}$	5	$x^3 \pm y^4$	$a_1 x + a_2 y + a_3 x y + a_4 y^2 + a_5 x y^2$

В открытых системах могут наблюдаться сложные, длительные хаотичные переходные режимы, скрытый порядок которых невозможно выявить без знания его алгоритма. Возможность существования «ложного» хаоса иллюстрируется «возвращением Пуанкаре» (рис. 1): изображение, переведённое в цифровую форму, растягивается по диагонали, выходящие за пределы рамки участки отрезаются и вставляются вновь; после определенного числа таких преобразований распознаваемое изображение исчезает, а затем вновь возникает из казалось бы полного хаоса.

Табл. 2. Канонические формулы потенциала в теории катастроф.

k	n	Каноническая форма $f(x, a)$	Название
1	1	$x_1^3 - ax_1$	Складка
2	1	$x_1^4 + a_1 \frac{x_1^2}{2} + a_2 x_1$	Сборка
3	1	$\frac{x_1^5}{5} + a_1 \frac{x_1^3}{3} + a_2 \frac{x_1^2}{2} + a_3 x_1$	Ласточкин хвост
4	1	$\frac{x_1^6}{6} + a_4 \frac{x_1^4}{4} + a_1 \frac{x_1^3}{3} + a_2 \frac{x_1^2}{2} + a_3 x_1$	Бабочка
3	2	$x_1^3 + x_2^3 + a_3 x_1 x_2 - a_1 x_1 - a_2 x_2$	Гиперболическая <u>омбилическая точка</u>
3	2	$x_1^3 - 3x_1 x_2^2 + a_3(x_1^2 + x_2^2) - a_1 x_1 - a_2 x_2$	Эллиптическая <u>омбилическая точка</u>
4	2	$x_1^2 x_2 + x_2^4 + a_3 x_1^2 + a_4 x_2^2 - a_1 x_1 - a_2 x_2$	Параболическая <u>омбилическая точка</u>
5	1	$x_1^7 + a_1 x_1^5 + a_2 x_1^4 + a_3 x_1^3 + a_4 x_1^2 + a_5 x_1$	Вигвам
5	2	$x_1^2 x_2 - x_2^5 + a_1 x_2^3 + a_2 x_2^2 + a_3 x_1^2 + a_4 x_2 + a_5 x_1$	Вторая эллиптическая <u>омбилическая точка</u>
5	2	$x_1^2 x_2 + x_2^5 + a_1 x_2^3 + a_2 x_2^2 + a_3 x_1^2 + a_4 x_2 + a_5 x_1$	Вторая гиперболическая <u>омбилическая точка</u>
5	2	$1 \pm (x_1^3 + x_2^4 + a_1 x_1 x_2^2 + a_2 x_2^2 + a_3 x_1 x_2 + a_4 x_2 + a_5 x_1)$	Символическая <u>омбилическая точка</u>

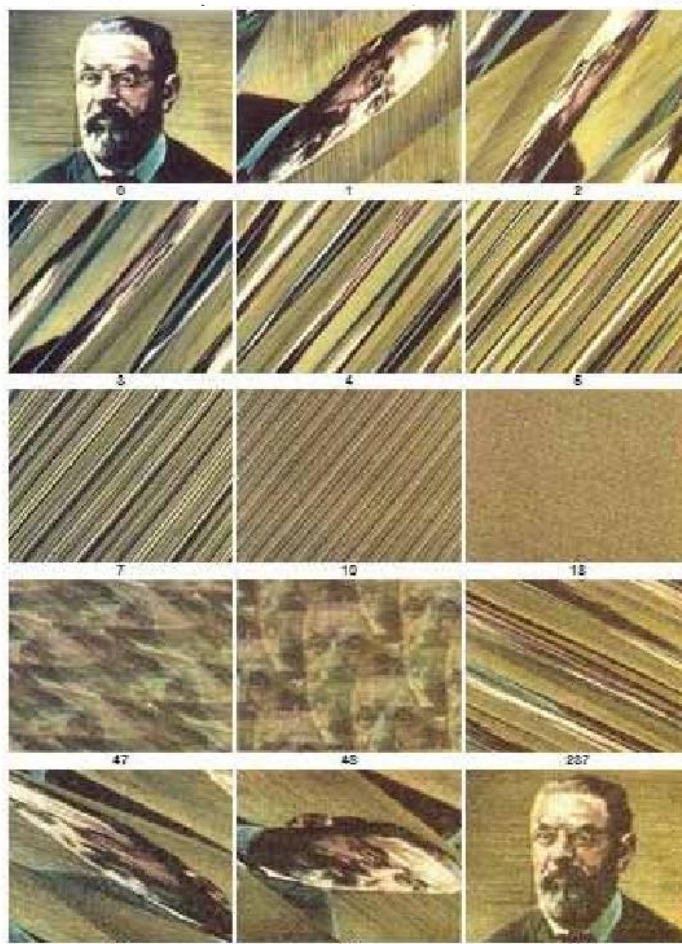


Рис. 1. Хаос, созданный применением геометрической операции растяжения.

Эффект растяжения иллюстрируют на примере портрета французского математика Анри Пуанкаре, основоположника теории динамических систем. Исходное изображение (вверху слева) было преобразовано в цифровую форму. Математическое преобразование растягивает изображение по диагонали, как будто оно нарисовано на резиновой поверхности. Там, где изображение вылезает за рамки исходного, оно обрезается и вставляется с другой стороны, как показано на кадре 1. (Номер кадра указывает на количество выполненных преобразований.) После

повторных применений преобразования разобрать лицо уже невозможно (кадры 2–4). В конечном счёте, появляется случайная комбинация цветов, дающая равномерное зелёное поле (кадры 10 и 18). Иногда случается так, что некоторые точки возвращаются к своему исходному положению, и тогда на короткое время проявляется исходное изображение (кадры 47–48, 239–241). При типичном хаотическом преобразовании такое возвращение осуществляется чрезвычайно редко. При наличии ничтожных фоновых флуктуаций время между возвращениями обычно столь велико, что вся информация об исходном изображении утрачивается.

Довольно часто катастрофы встречаются в восприятии; это связано с существованием двусмысленных, или "мультистабильных", фигур. Например, среди фигур, показанных на рис. 2а, четвёртая слева в верхнем ряду воспринимается с равной вероятностью как мужское лицо и как фигура девушки. Интересно, что если эта фигура включена в последовательность (верхний ряд на рис. 2а), то восприятие средних фигур сдвигается в зависимости от порядка, в котором эта последовательность рассматривается: в сторону мужчины, если фигуру рассматривать слева направо, и в сторону девушки в противном случае.

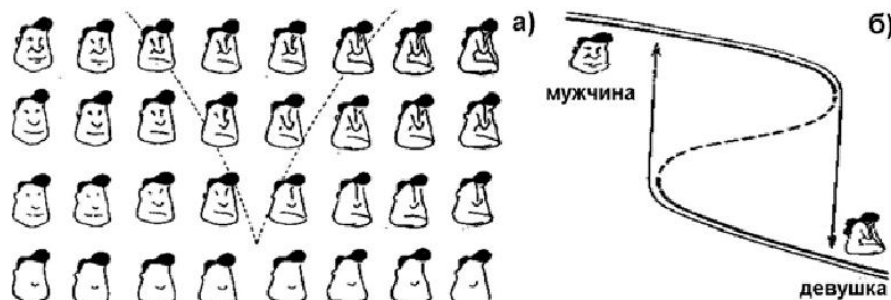


Рис. 2. Катастрофы в восприятии.

На рис. 2б представлено одномерное сечение катастрофы сборки с принципом промедления.

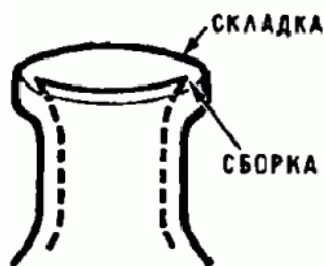


Рис. 3. Экспериментальное наблюдение сборки Уитни. На поверхности бутылки можно увидеть две сборки. Они устойчивы, в чём можно убедиться, покачивал бутылку.

Заметим, что отображения гладких поверхностей на плоскость часто встречаются в реальных ситуациях. Действительно, большинство окружающих нас тел ограничено гладкими поверхностями, при этом видимые контуры тел являются проекциями поверхностей, ограничивающих тела, на сетчатку глаза. Приглядываясь к окружающим нас телам, например, к лицам людей, можно изучить особенности видимых контуров. Например, точки сборки обнаруживаются в чертах людей там, где линия контура «исчезает» (рис. 4). При этом видно, что линия контура имеет касательную вплоть до точки сборки, но с приближением к этой точке кривизна линии растёт до бесконечности.



Рис. 4. Сборка и складка на лице человека.

2.2 Машина катастроф Зимана

Скачкообразный переход количества в качество, при котором непрерывно меняющиеся причины приводят к резким, прерывно меняющимся следствиям, т.е. когда ничтожное изменение начального состояния приводит к мгновенному, заранее непредсказуемому результату, наглядно демонстрирует "машина катастроф" Э.Зимана.

Эта машина состоит из диска, вращающегося вокруг вертикальной оси. К одной из точек на периферии диска прикреплены две резиновые нити. Свободный конец одной из нитей жёстко закреплен в точке Q , а свободный конец другой – P – может свободно перемещаться в плоскости, параллельной плоскости диска. Карандаш, прикрепленный к резинке в точке P рисует на бумаге, лежащей на дощечке. Перемещая карандаш, осуществляют вращение диска, так что состояние системы описывается положением карандаша и диска. Если P плавно перемещать вне ромбовидной области, диск будет плавно поворачиваться в ту или в другую сторону. Но когда P попадает в область $ABCD$, положение меняется. Предположим, точка P движется по линии $UVWXYZ$ слева направо. При медленном движении точки диск плавно поворачивается. Но вот когда P выходит из ромба в точке Y , диск резко, скачком меняет угол поворота. Но когда P начинает перемещаться в обратном направлении по той же прямой, в точке Y никакого скачка не происходит! Он появляется на этот раз в точке V , там, где P выходит из ромба.

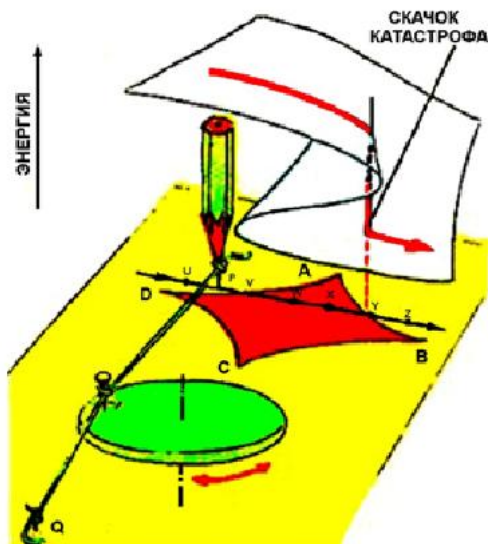


Рис. 5. Машина катастроф Зимана.

Таким образом, поведение диска не меняется на прямо противоположное, когда P проходит прежний путь $ZYXWVU$ в обратном направлении. Когда P попадает в любую точку, находящуюся вне ромбовидной области $ABCD$, у диска есть только одно положение устойчивого равновесия. Когда же P попадает внутрь этой области, устойчивых положений уже два.

Таким образом, при изменении положения карандаша (два внешних параметра), колесо поворачивается, плавно отслеживая изменение параметров, но в некоторых случаях меняет своё положение скачком. Такие скачки происходят при исключительных («бифуркационных») положениях карандаша: они образуют на листе бумаги «кривую катастроф» с четырьмя точками возврата. При пересечении кривой катастроф катастрофа (скачок колеса) может произойти, а может и не произойти, в

зависимости от предыстории.

Для математического анализа работы такого устройства используется трёхмерное пространство, в котором по вертикальной оси откладывается энергия равновесных положений диска X , а по горизонтальным осям – координаты точки P . Возникает поверхность со складкой, изображающая собой совокупность всех равновесных положений диска. Проекция складки на плоскость образует часть ромбовидной области, примыкающей к точке A . Когда P находится вне заштрихованной области, каждому её положению соответствует одно-единственное значение X и

одна-единственная точка на поверхности: состояние системы здесь описывается однозначной функцией. Но когда P оказывается внутри заштрихованной площади, одному положению P соответствуют три значения X на разных частях складки. Функция здесь перестаёт быть однозначной.

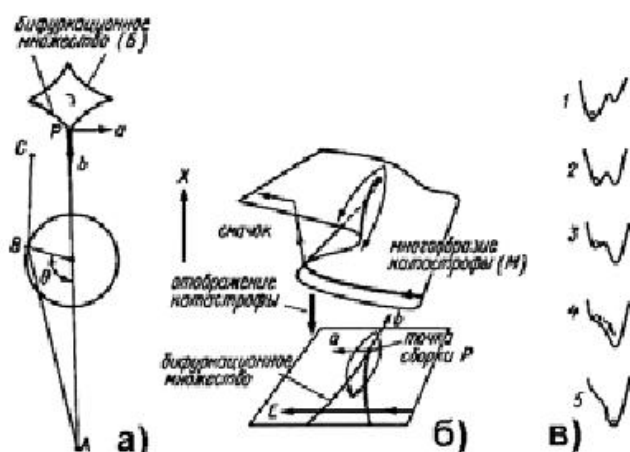


Рис. 6. а – машина Зимана; б – геометрия катастрофы сборки; в – графики функции потенциальной энергии Uab .

Такая модель хорошо объясняет поведение диска. При движении P слева направо X движется вдоль гладкой поверхности до тех пор, пока не достигается край перегиба. Дальнейшее нарастание координаты приводит к резкому перескоку X с верхнего на нижний уровень – так называемая «катастрофа» Тома. При движении P в обратном направлении – справа налево – X перемещается плавно по нижней поверхности складки, пока не достигнет её края. Дальнейшее изменение координаты приводит снова к «катастрофе» – скачку с нижнего на верхний уровень. Эта простейшая модель, в которой энергия равновесия зависит всего от двух независимых переменных – координат точки P .

Состояние машины катастроф описывается тремя числами. Положение острия карандаша задаётся двумя координатами (они называются управляющими параметрами). Положение диска определяется ещё одним числом – углом поворота (внутренний параметр системы – управляемый параметр). Если все три числа заданы, и определены степени растяжения резинок, то определена потенциальная энергия всей системы. Диск поворачивается так, чтобы эту энергию минимизировать. При фиксированном положении карандаша потенциальная энергия – функция от положения диска, т. е. функция, заданная на окружности. Эта функция может иметь в зависимости от значений управляющих параметров один или несколько минимумов.

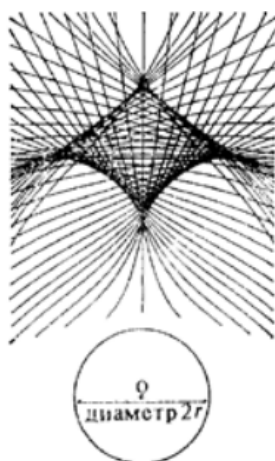


Рис. 7. Линии, рисуемые карандашом в машине катастроф.

Пользуясь этим рисунком можно переходить с одного места поверхности равновесий на другое без скачков.

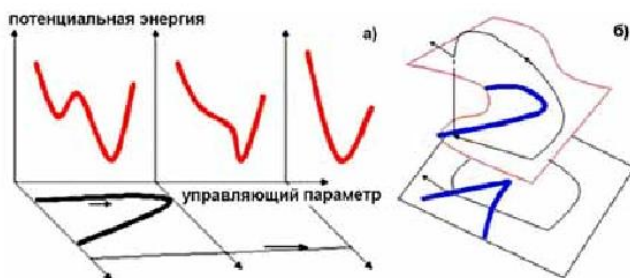


Рис. 8. а – потенциальная энергия машины катастроф; б – поверхность равновесий машины катастроф.

Замечание. Теория особенностей позволяет объяснить поведение машины и предсказать, в каких случаях «катастрофа» произойдет, а в каких нет.

Пространство состояний машины трехмерно (два внешних параметра определяют положение карандаша, один внутренний — угол поворота колеса). Потенциальная энергия системы является функцией этих трёх переменных (по углу она периодична). При фиксированных значениях внешних параметров система минимизирует потенциальную энергию (локально). Возникающая зависимость между значениями внутренних и внешних параметров изображается в трёхмерном пространстве двумерной *поверхностью равновесий*. Поверхность равновесий образована критическими точками потенциальной энергии, рассматриваемой как функция внутреннего параметра при фиксированных значениях внешних. Эти критические точки при всевозможных значениях внешних параметров образуют поверхность в пространстве-произведении. Поверхность равновесия машины Зимана гладкая и расположена общим образом относительно проектирования на плоскость внешних переменных. Отображение проектирования имеет особенностями *складки* и *сборки* Уитни (а именно, 4 точки сборки, проектирующиеся в точки возврата кривой катастроф).

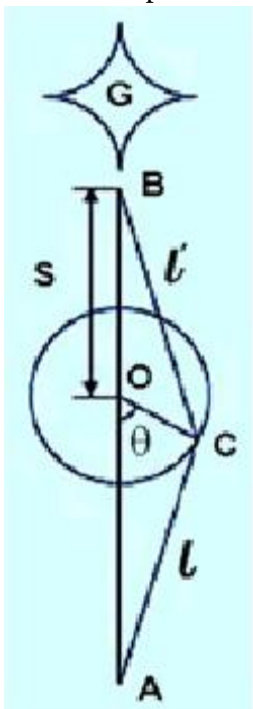
Кривая катастроф - проекция на плоскость сборки Уитни. Хотя сама поверхность геометрически не видна, и представляет собой поверхность в абстрактном пространстве состояний системы, всё же проекция особенности этой поверхности может быть наглядно изображена в виде кривой катастроф в левой части дощечки. Невидимое обнаруживает себя в видимом.

Теория особенностей позволяет объяснить поведение машины и предсказать, в каких случаях «катастрофа» произойдёт, а в каких нет. Пространство состояний машины трехмерно (два внешних параметра определяют положение карандаша, один внутренний — угол поворота колеса). Потенциальная энергия системы является функцией этих трёх переменных (по углу она периодична). При фиксированных значениях внешних параметров система минимизирует потенциальную энергию (локально). Возникающая зависимость между значениями внутренних и внешних параметров изображается в трёхмерном пространстве двумерной *поверхностью равновесий*.

Поверхность равновесий образована критическими точками потенциальной энергии, рассматриваемой как функция внутреннего параметра при фиксированных значениях внешних. Эти критические точки при всевозможных значениях внешних параметров образуют поверхность в пространстве-произведении. Поверхность равновесия машины Зимана гладкая и расположена общим образом относительно проектирования на плоскость внешних переменных. Отображение проектирования имеет особенностями *складки* и *сборки* Уитни (а именно, 4 точки сборки, проектирующиеся в точки возврата кривой катастроф).

Рис. 9. К математической модели машины катастроф.

При подходе значений внешних параметров к кривой катастроф критические точки потенциальной энергии как функции на окружности перестраиваются. При пересечении кривой катастроф в её точке общего



положения сливаются две критические точки потенциальной энергии — локальный максимум и локальный минимум. Система, находящаяся в устойчивом состоянии равновесия в точке локального минимума потенциальной энергии, остаётся в нём до момента бифуркации. В этот момент критическая точка становится неустойчивой, и система скачком переходит в другое состояние равновесия (отвечающее другому минимуму потенциальной энергии). Таким образом, будет ли скачок при пересечении линии катастроф, зависит от того, в каком из локальных минимумов потенциальной энергии находилась система до пересечения. В точке возврата линии катастроф сливаются три «листа» поверхности равновесия (два крайних отвечают локальным минимумам, а средний — локальному максимуму потенциальной энергии). Зная из теории Уитни, как эти листы переходят друг в друга вблизи точки сборки, легко прогнозировать скачки при различных путях обхода точек возврата кривой катастроф. При математическом описании действия машины катастроф возьмём в качестве единицы длины диаметр диска, так что длины нерастянутых резинок равны 1, $OC=0,5$, $OA=2$. Начнём с определения положения карандаша P . Когда точка B перемещается вдоль оси, всегда имеется положение равновесия, отвечающее $q=0$. Точка P находится там, где это равновесие меняется с устойчивого (локальный минимум энергии) на неустойчивое (локальный максимум). Пусть l и l' — длины резинок в положении, когда диск повернут на угол q , близкий к 0, но не обязательно равный 0. Потенциальная энергия системы:

$$U_s(\theta) = \frac{k(l-1)^2}{2} + \frac{k(l'-1)^2}{2}, \quad (1)$$

где k — константа в законе Гука (модуль упругости резинок).

По теореме Пифагора

$$l^2 = (OA - OC \cos \theta)^2 + (OC \sin \theta)^2 = \left(2 - \frac{1}{2} \cos \theta\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \sin \theta\right)^2 \quad (2)$$

Будем полагать, что угол θ мал и воспользуемся разложениями

$$\sin \theta = \theta + O(\theta^3), \quad \cos \theta = 1 - \frac{\theta^2}{2} + O(\theta^4) \quad (3)$$

Тогда

$$l^2 = \left[2 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\theta^2}{2}\right)\right]^2 + \left(\frac{1}{2} \theta\right)^2 + O(\theta^4) = \frac{9}{4} + \theta^2 + O(\theta^4)$$

$$l = \frac{3}{2} + \frac{\theta^2}{3} + O(\theta^4). \quad (4)$$

Совершенно аналогично

$$l' = \left(S + \frac{1}{2}\right) - \frac{S\theta^2}{2(2S+1)} + O(\theta^4). \quad (5)$$

Выражение для потенциальной энергии имеет вид:

$$U_s(\theta) = \frac{k}{4} \left[\frac{1}{4} + \left(S - \frac{1}{2}\right)^2 + \theta^2 \left(\frac{1}{3} - \frac{S(2S-1)}{2(2S+1)}\right) \right] + O(\theta^4) \quad (6)$$

Лемма Морса: В выражении для потенциальной энергии можно пренебречь членами порядка $O(q^4)$, если коэффициент при q^2 отличен от нуля.

Основываясь на лемме Морса, можно сделать вывод, что потенциальная функция имеет минимум только тогда, когда множитель при квадратном члене положителен. Потенциальная энергия имеет максимум только тогда, когда коэффициент при квадратичном члене отрицателен. Условие изменения состояния равновесия определяется уравнением

$$\frac{1}{3} = \frac{S(2S-1)}{2(2S+1)}; \quad 6S^2 - 7S - 2 = 0; \quad S = \frac{7 + \sqrt{97}}{12} \approx 1,404071483. \quad (7)$$

Аналогичное рассуждение с заменой $q=0$ на $q=p$ позволяет определить положение верхнего клюва P' , для которого

$$S = \frac{27 + \sqrt{489}}{20} \approx 2,46. \quad (8)$$

В более подробном анализе учитывается отброшенный ранее член с θ^4 . Тогда потенциальная энергия приобретает вид

$$U_{ab}(x) = \frac{1}{4}x^4 + \frac{1}{2}ax^2 + bx, \quad (9)$$

где величины a и b не имеют принципиального значения.

Это — катастрофа сборки.

2.3 Качалки

Рассмотрим простой пример физической системы, склонной к потере устойчивости – параболическую качалку. Простейшая качалка изготавливается путём вырезания двух кусков картона в форме параболы и скреплением их между собой (рис. 10). Прикрепим к ней грузик. Качалка наклонится и займёт некоторое положение равновесия. Если мы её толкнём, то она, либо займёт новое положение равновесия, либо вернётся в исходное. Если качалка находится в положении равновесия, то центр тяжести расположен точно по вертикали над точкой опоры. Когда качалка покоится на горизонтальной плоскости, эта плоскость будет касательной к параболе, так что центр тяжести лежит на соответствующей нормали (прямой, проходящей через точку касания перпендикулярно к касательной). Некоторые из этих нормалей изображены на рис.10.

Где бы не располагался центр тяжести на нормали, построенной в заданной точке, центр тяжести окажется над этой точкой и качалка с опорой на эту точку будет находиться в равновесии. Однако при одних положениях центра тяжести на этой нормали качалка после малых отклонений будет возвращаться в положение равновесия (т.е. равновесие устойчиво), а при других она будет падать, как яйцо, поставленное на острый конец (равновесие неустойчиво).

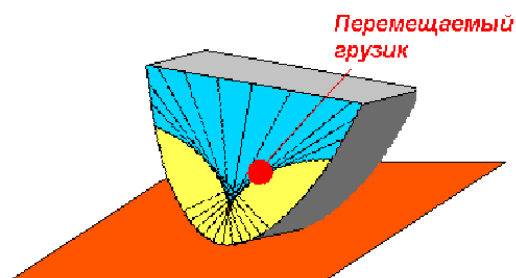


Рис. 10. Параболическая качалка: управляющие параметры – координаты грузика, показанного красным кружком. Нанесены нормали – прямые, проходящие через точку касания перпендикулярно плоскости стола. При выходе из желтой области происходит “катастрофа” – скачкообразное изменение состояния.

Можно рассчитать, сколько положений равновесия имеет параболическая качалка при различных положениях грузика и определить, как будет меняться положение равновесия, если непрерывно менять положение грузика. В результате можно предсказать, когда малое изменение в положении центра тяжести приведёт к новому положению равновесия, лишь слегка отличающегося от первоначального, а когда оно приведёт к тому, что качалка начнёт катиться (катастрофа).

Параболическая качалка имеет один внутренний параметр θ (угол между осью параболы и плоскостью стола) и два управляющих параметра a и b , задающих положения грузика. При фиксированных значениях управляющих параметров положения равновесия системы соответствуют критическим точкам потенциальной энергии $V_{ab}(\theta)$. Таким образом, задано двухпараметрическое семейство функций $V_{ab}(x)$, и задача состоит в описании деформации множества критических точек $\Sigma = \{x | V_{ab}'(x) = 0\}$ функций семейства при изменении параметров (a, b) .

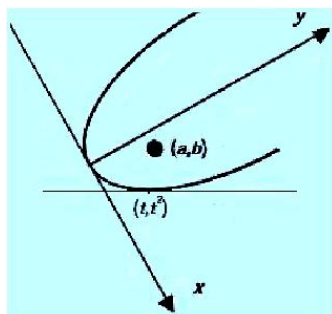


Рис. 11. Качалка и система координат, связанная с ней. В точке a, b сосредоточена основная масса.

Координаты центра масс – (a, b) , a и b – переменные управления, т.е. параметры, с помощью которых можно менять состояние системы. Множество значений этих переменных образует пространство управления.

Рассмотрим поведение качалки при изменении положения центра масс (т.е. координат a, b). Найдём уравнение касательной к точке (t, t^2) (рис. 11). Поскольку уравнение параболы $y = x^2$, то угловой

коэффициент прямой $k = y' = 2x$. Поскольку касательная должна проходить через точку (t, t^2) , то

$$t^2 = kt + b = 2t^2 + b$$

следовательно, $b = -t^2$

$$y = 2tx - t^2.$$

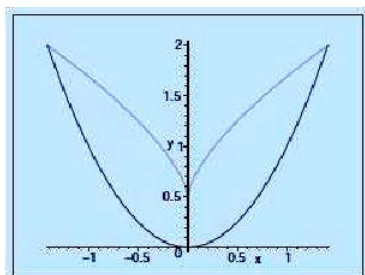
Расстояние от точки с координатами (a, b) до прямой $y = 2tx - t^2$ определяется выражением

$$S^2 = \frac{b^2 + 2bt^2 + t^4 + 4a^2t^2 - 4at^3 - 4abt}{1 + 4t^2} = \frac{(b - 2at + t^2)^2}{1 + 4t^2} \quad (12)$$

Тогда потенциальная энергия качалки

$$U(t) = mgS(t) = mg \frac{b - at + t^2}{\sqrt{1 + 4t^2}} \quad (13)$$

Рис. 12. Линия кратных корней в задаче “качалка”.



Состояния равновесия качалки соответствуют

экстремальным значениям потенциала. Для определения экстремумов продифференцируем потенциал и приравняем производную нулю.

$$\dot{U} = 2mg \frac{2t^3 + (1-2b)t - a}{(1+4t^2)^{3/2}} = 0. \quad (14)$$

Таким образом, состояниям равновесия соответствуют корни уравнения

$$2t^3 + (1-2b)t - a = 0 \quad (15)$$

Найдём теперь уравнение нормали к точке касания (t, t^2) . Уравнение должно иметь вид

$$y = -\frac{x}{2t} + c \quad (16)$$

$$\left(-\frac{1-2b}{6}\right)^{1/2} \left(2\frac{1-2b}{3}\right) + a = 0. \left(\frac{2b-1}{6}\right)^{1/2} \left(2\frac{2b-1}{3}\right) = a \quad (17)$$

$$2(2b-1)^3 = 27a^2. \quad (18)$$

Это уравнение аналогично уравнению для машины катастроф, т.е. описывает каноническую сборку Уитни.

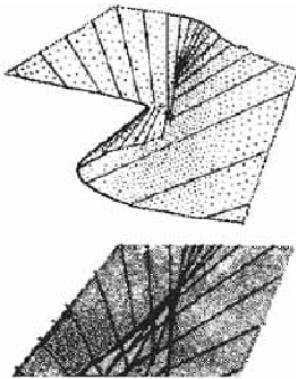


Рис. 13. Поверхность катастрофы для качалки.

Математический аппарат качалки использован при описании устойчивости кораблей (эту проблему мы подробно обсудим в одной из следующих лекций).

2.4 Механика конструкций

Изучение поведения статических конструкций под нагрузкой и их чувствительности к несовершенству тесно связано с теорией катастроф.

Задача описания поведения упругой конструкции, под воздействием увеличивающейся нагрузки внезапно, скачкообразно переходящей в другое положение (направление выгиба конструкции предсказать невозможно) имеет глубокие исторические корни. В 1744 г. Л.Эйлер использовал созданный им математический аппарат (вариационное исчисление) для определения равновесных состояний сжатой упругой колонны. В предположении о малости поперечных сечений он рассмотрел устойчивость прямолинейной формы равновесия вертикально расположенного линейно-упругого стержня, сжатого сжимающей силой (эластика Эйлера). Ж.Лагранж в 1788 г. доказал, что минимум полной потенциальной энергии системы является достаточным для устойчивости. Он получил решение этой задачи без ограничений на величину поперечных отклонений и показал, что её математическое описание приводит к нелинейному дифференциальному уравнению.

В настоящее время крупногабаритную техническую конструкцию описывают с помощью потенциальной функции, минимальное значение которой определяет её устойчивое состояние. С увеличением нагрузки на конструкцию (мост, здание и т.д.) потенциальная функция изменяется. Значительная нагрузка может привести к потере устойчивости конструкции (т.е. к её разрушению) вследствие нарушения локально устойчивого состояния. Равновесие, устойчивость и потеря устойчивости - основные вопросы, рассматриваемые теорией катастроф, методы которой позволяют определить чувствительность критической, или разрушающей нагрузки, как к несовершенству конструкции, так и к динамическому воздействию. Кроме того, они оказываются эффективными при изучении составных систем, для которых возможны различные формы разрушения. Результаты исследования технических конструкций очень важны для их возведения, эксплуатации и разрушения. Теория катастроф используется при рассмотрении систем (составленных из нескольких конструктивных элементов), способных к неожиданным формам разрушения и обладающих жёсткой чувствительностью к несовершенству, если между элементами существует сильная связь. Примером является разрушение опорного кронштейна.

В качестве примера рассмотрим прогиб эйлера стержня под действием сжимающей нагрузки.

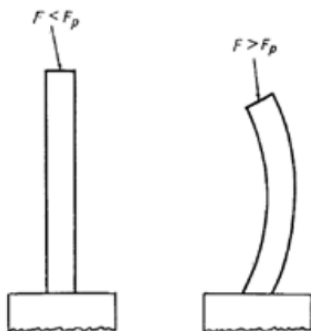


Рис. 14. Прогиб колонны при превышении критической нагрузки.

Пусть к одному концу идеального несжимаемого стержня приложена сила F (рис. 14), тогда если нагрузка (сила F), действующая на стержень, невелика, стержень остаётся прямым; при очень большой

нагрузке F стержень сильно изгибается (предсказать, в какую именно сторону он изогнётся невозможно). Можно показать, что задача расчёта изгиба стержня в зависимости от силы F сводится к многообразию катастрофы сборки $x^3+ax+b=0$, так что устойчивость стержня вдоль кривых равновесия (рис. 15) определяется свойствами устойчивости катастрофы сборки.

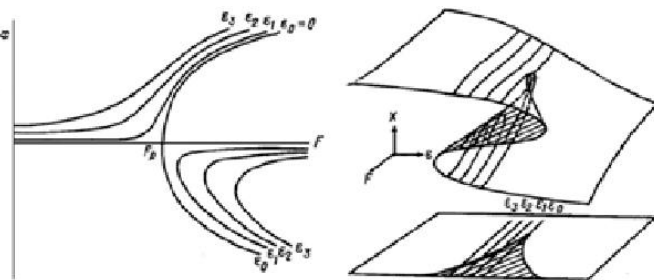


Рис. 15. Зависимость равновесной конфигурации несовершенного стержня от прилагаемой нагрузки и параметра несовершенства.

Выгибание нагруженного эйлера стержня аналогично фазовому переходу 2-го рода. Переход к выгнутому состоянию является "мягким", т.к. состояния системы до и после изгиба связаны непрерывным образом. Конструкции, демонстрирующие мягкий переход в изогнутое состояние, не разрушаются при превышении предельной нагрузки - они лишь умеренно изгибаются. Это позволяет сформулировать критерии определения пределов безопасных нагрузок и рассчитать максимальную несущую способность стержня.

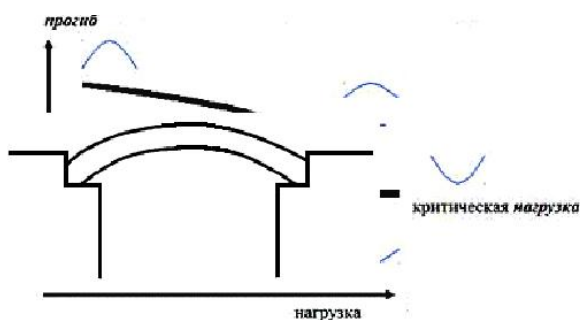


Рис. 16. Пологая арка - типичный элемент конструкции.

Работающие на сжатие балки - не единственные элементы конструкций. Для перекрытия мостовых пролетов эффективным является использование пологой арки (рис. 16). Если малые вертикальные нагрузки не вызывают деформации арки, то большие нагрузки приводят к

её разрушению. Можно показать, что разрушающаяся арка описывается с помощью катастрофы двойной сборки.

Рассмотрим проблему устойчивости конструкции на примере упругой пластмассовой линейки. Если положить линейку на две опоры и ставить по очереди небольшие грузики на середину линейки, в какой-то момент времени линейка выгнется и сбросит грузики. Происходит катастрофа (постепенное изменение нагрузки вызвало внезапный ответ системы).

Рассмотрим зависимость упругой энергии линейки от её прогиба для пяти значений приложенной нагрузки (рис. 17).

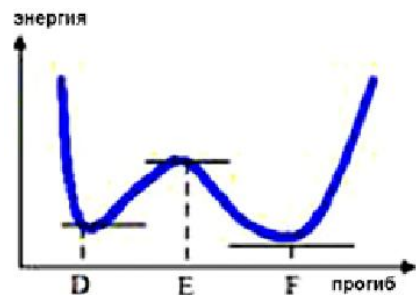


Рис. 17. Зависимость упругой энергии линейки от её прогиба.

Каждому возможному прогибу соответствует некоторая энергия. Состояние равновесия - это точки, которым на кривой зависимости энергии линейки от её прогиба соответствуют горизонтальные участки. При нулевой нагрузке зависимость имеет W-образную форму (рис. 17).



Рис. 18. Характер зависимости энергии от состояния.

прогиб вверх увеличение нагрузки критическая нагрузка прогиб вниз

Состояния, соответствующие точкам D и F , устойчивы, а состояние, соответствующее точке E , неустойчиво. Кривую можно разбить на три области: устойчивая, неустойчивая, устойчивая. Поэтому после того как линейка сбросила грузики, она прогнулась вниз, так как для прогиба вверх она должна преодолеть энергетический барьер, а дополнительного воздействия извне в рассматриваемом случае нет.

Так как нет внешнего воздействия, благодаря которому система может преодолеть энергетический барьер, то система подчиняется правилу запаздывания (или промедления). Линейка может прогнуться вверх, если на нее действует сила, направленная вверх (отрицательная нагрузка). Такое явление называется гистерезисом. Зная характер зависимости прогиба от нагрузки, можно объяснить, почему линейка внезапно изменила свою форму: изменилось ее состояние - оно перестало быть устойчивым - произошла катастрофа.

2.5 Геометрия жидкости

Известная модель, используемая для изучения перехода к хаосу в потоке жидкости включает в себя два вращающихся в противоположных направлениях эксцентрических цилиндра. С увеличением скорости вращения внутреннего цилиндра наблюдается переход от постоянной скорости к периодически изменяющейся, и затем – к аperiodическому режиму.

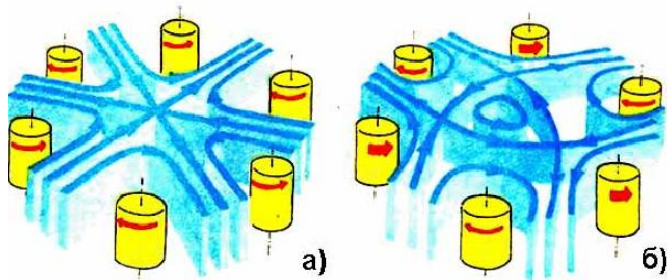


Рис. 19. Катастрофа в потоке жидкости.

Интересно поведение двумерного потока, создаваемого шестью симметрично расположенными, вращающимися навстречу друг другу роликами. Линии тока получаются такими, какие показаны на рис.

19 а только в том случае, если скорость вращения всех роликов одинакова. Малейшее отклонение в скоростях вращения приводит к «катастрофе» – скачкообразному изменению картины линий тока. Так, если все ролики, вращающиеся против часовой стрелки, увеличат свою скорость, картина мгновенно перестроится и станет такой, как показано на рис. 19б.

2.6 Оптика и теория рассеяния

Как мы уже упоминали в первой лекции, важным явлением в геометрической оптике является образование каустик, т.е. резких ярких кривых, которых касаются световые лучи.

В результате отражения от криволинейной поверхности через некоторые точки трёхмерного пространства проходит два или более лучей. Вдоль огибающих (рис. 20) интенсивность света существенно выше, чем в окрестности точек, лежащих вне огибающей. Подобное усиление интенсивности в точках огибающей может сопровождаться локальным повышением температуры, достаточным для воспламенения бумаги или дерева. Такие огибающие называют каустиками.

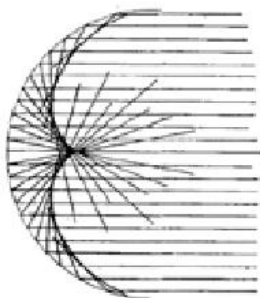
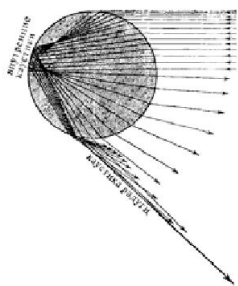


Рис. 20. Огибающая лучей, отражённых от линейной поверхности, образует каустики.

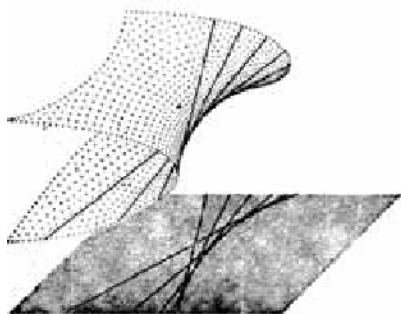
Каустика, образованная отражением параллельного пучка сферической поверхностью, выглядит подобно катастрофе сборки.



Рассмотрим пучок параллельных лучей в плоскости, встречающихся с кругом (рис. 21) и отражающихся от его "задней стенки" согласно закону отражения. Отражённые лучи имеют огибающую - кривую с остриём (каустика). Каустика возникает из-за того, что, будучи касательными к ней, образующие её лучи почти совпадают между собой, и потому в малой части пространства собирается больше лучей, чем где-либо ещё, что и приводит к большей яркости.

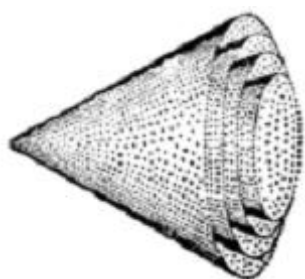
Рис. 21. Схема возникновения каустики типа радуга.

Рис. 22. Каустика радуги, отвечающая катастрофе складки.



Самой известной каустикой является радуга, которая может служить примером катастрофы складки. Для света данной длины волны лучи, выходящие из шаровой капельки дождя (после одного внутреннего отражения), имеют огибающую каустическую (рис. 22), которая является гладкой и (в сечении плоскостью рисунка) почти прямолинейной уже на расстоянии нескольких диаметров от капельки. Эта каустика отвечает катастрофе складки (рис. 23). Каустика вращается вокруг прямой, идущей от капельки к солнцу, и результат оказывается таким, как если бы капелька излучала яркий конус света с осью, указывающей на солнце. С изменением длины волны меняется угол при вершине конуса (поскольку показатель преломления для разных длин волн разный), так что можно представлять себе капельку излучающей свет коаксиальными окрашенными конусами, как на рис. 24.

Наблюдатель с земли увидит лучи данного цвета лишь в определённых направлениях, отвечающих углу при вершине соответствующего конуса, и в результате он видит многоцветную



круговую дугу радуги (рис. 24). Радуги, состоящие из более, чем одной дуги, являются результатом многократного отражения лучей.

Рис. 23. Капелька воды, излучающая свет коаксиальными окрашенными конусами.

Крайне высокая интенсивность, которой обладают различные цвета в различных избранных направлениях, определяемых каустиками складки, не даёт им вновь смешаться в белый цвет. Вот почему радуга ярче своего окружения, и ора или облако служат для нее тёмным фоном.

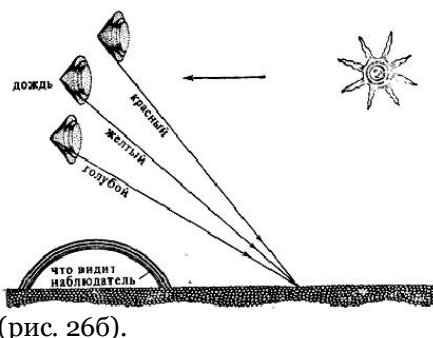


Рис. 24. Образование многоцветной дуги радуги.

Оптические катастрофы играют также роль в образовании некоторых типов миражей.

Миражи происходят, когда температурные градиенты в атмосфере искривляют лучи света. Если температура с высотой падает (рис. 26а), то световые лучи, попадающие в глаз наблюдателя, приходят туда по искривленным путям

(рис. 26б).

Эти пути имеют огибающую типа складки. Многозначный характер соответствующего многообразия катастрофы, который проявляется видимым образом: для объекта, находящегося в точке А, два идущих от него луча попадают в глаз наблюдателя. Хороший способ сделать этот эффект графически наглядным состоит в том, чтобы деформировать действительное "пространство объектов" таким образом, чтобы все световые лучи стали прямыми, поскольку именно так глаз интерпретирует то, что видит; тем самым получается фиктивное "пространство образов" (рис. 26в). Для объекта в точке В будут две видимые копии в пространстве образов, нижняя из которых перевернута вверх ногами.

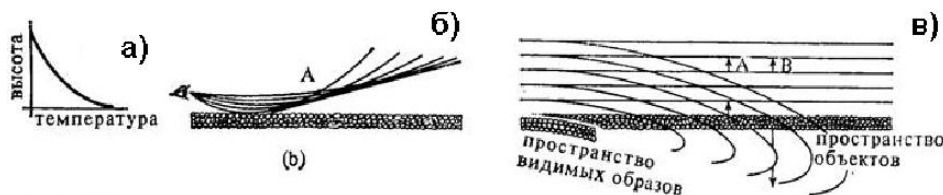


Рис. 25. Схема возникновения миража.

В случае, когда вместо складки появляется сборка, мы можем получить тройной мираж. При верхнем мираже температура должна иметь точку перегиба (рис. 26). Объект в точке А смещается немного вверх; объект в точке В смещается ещё больше и появляется трижды, причём средняя копия перевернута, а верхняя сильно сжата; объект в точке С смещается ещё выше и виден уже как один очень сильно удалённый образ.

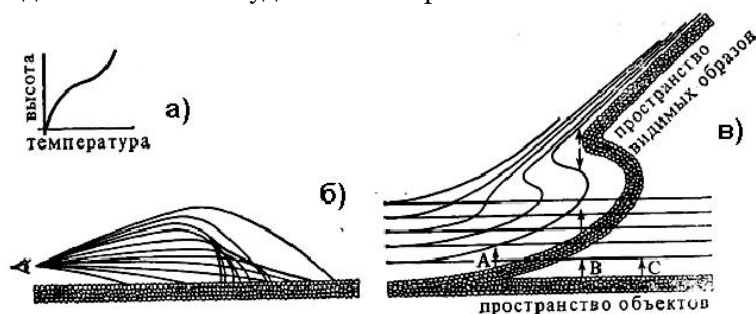


Рис. 26. Схема возникновения тройного миража.

Хотя на рисунках и видны огибающие, они имеют смысл, только когда выбрано положение наблюдателя, т.е. это не физические каустики.

2.7 Термодинамика и фазовые переходы

Классическая теория фазовых переходов естественным образом укладывается в рамки элементарной теории катастроф.

Как известно, в термодинамических системах вблизи точек фазового перехода такие параметры, как давление, температура, термодинамические потенциалы, удельная теплоемкость и

т.п., испытывают разрывы и скачки, а внутри самих систем появляются крупномасштабные структуры, совершенно не мыслимые вдали от критических точек. Если взять для простоты физический газ в равновесном состоянии, то для него достаточно трёх макроскопических величин (температура, давление и объём). Эти величины не являются независимыми, потому что их связывают друг с другом уравнение состояния, которое описывает двухмерную поверхность в пространстве трёх параметров.

Скачкообразная перестройка структуры (катастрофа) характерна для всех фазовых переходов, например, переход жидкость-пар или жидкость-твёрдое вещество, которые демонстрируют ещё одну особенность катастрофы сборки. Резкий переход, описываемый классической сборкой с петлей гистерезиса, возможен и тут, когда перегретая жидкость взрывообразно испаряется (переохлажденная — мгновенно кристаллизуется), но обычно наблюдается постепенное испарение жидкости при сохранении постоянной температуры и давления до тех пор, пока не будет полностью завершён переход в новое состояние. В первом случае реализуется принцип максимального промедления, а в последнем — принцип Максвелла, который имеет место при высоком уровне “шума” (случайных внешних воздействий, порождающих флуктуации), не позволяющего осуществиться принципу максимального промедления.

Принцип максимального промедления - состояние системы определяется устойчивым (стабильным) или метастабильным минимумом до тех пор, пока он существует.

Принцип Максвелла - состояние системы определяется глобальным минимумом потенциальной функции.

Уравнение состояния реального газа (уравнение Ван-дер-Ваальса, 1873 г.) устанавливает связь между давлением, объёмом и температурой:

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right)(V_m - b) = nRT, \quad (19)$$

где p — давление, V_m — молярный объём T — абсолютная температура, R — универсальная газовая постоянная, n — число молей.

Это уравнение Ван-дер-Ваальса описывает поведение жидкости вблизи её критической точки. Уравнение было получено как соотношение между тремя параметрами V , P , T жидкости в окрестности ее критической точки:

$$pV^3 - (RT + pb)V^2 + aV - ab = 0, \quad (20)$$

где p — давление, V — объём газа, R — газовая постоянная, T — температура, a и b — постоянные для каждого газа величины.

Уравнение Ван-дер-Ваальса описывает критическое многообразие катастрофы сборки. Если зафиксировать некоторую точку в этом многообразии, то можно исследовать линейный отклик системы на малые возмущения.

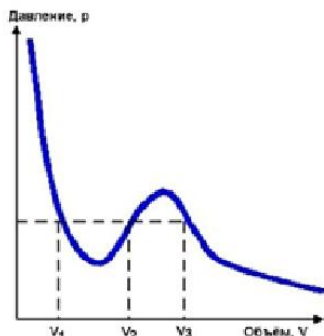


Рис. 27. Кривая Ван-дер-Ваальса: функция $F(x; a, b) = +x^4 + ax + bx^2$, на базе которой строится поверхность, определяющая состояние системы газжидкость.

Уравнение катастрофы сборки A_{+3} :

$$F(x; a, b) = +x^4 + ax + bx^2 \quad (21).$$

Разделим уравнение Ван-дер-Ваальса (20) на p

$$V^3 - (RT/p + b)V^2 + aV - ab/p = 0. \quad (22)$$

Переобозначив коэффициенты при V в (22), учитывая, что p прямопропорционально V , получим:

$$V^4 - BV^2 + AV - C = 0, \quad (23)$$

Кривая, описываемая уравнением (22) показана на рис. 27.

Замечание. Под критической точкой обычно понимают точку, где производная функция обращается в нуль. В термодинамике под ней понимают вырожденную критическую точку, которая является минимум (для энтропии - максимумом)

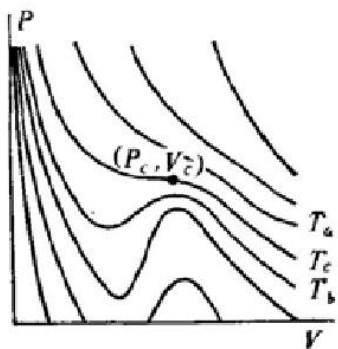


Рис. 28. Набор кривых Ван-дер-Ваальса при разных температурах.

Уравнение Ван дер Ваальса обычно представляют графически, рисуя графики P в зависимости от V при различных значениях T (рис. 28). Более наглядным является представление в виде поверхности (рис. 29), образованной точками P , V , T . Пусть

для рассматриваемого вещества понижается давление при постоянной температуре. Из рисунка видно, что может представиться несколько возможностей. - Если эта температура $T_a > T_c$, то объём плавно увеличивается. - Если температура в точности равна T_c , то V будет непрерывной функцией от P .

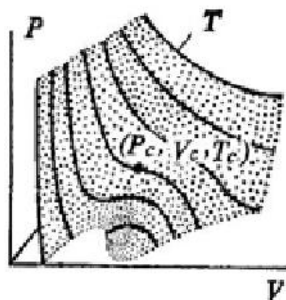


Рис. 29. Поверхность Ван дер Ваальса.

Если эта температура равна $T_b < T_c$, то имеются давления, при которых возможны несколько значений объёма, так что из уравнения нельзя получить объём как функцию от давления. Очевидно, что вещество, вынуждаемое следовать по кривой $P-V$, должно в некоторой точке произвести скачок.

Перед скачком вещество отвечает на малое уменьшение объёма значительно бóльшим увеличением давления, чем после скачка: трудносжимаемая жидкость внезапно становится легкосжимаемым газом.

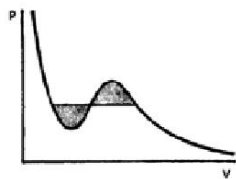


Рис. 30. Условие выполнения правила Максвелла.

Каким образом решает вещество, в какой точке совершить скачок? В 1875 г. Максвелл вывел правило равных площадей, согласно которому часть исходной кривой надо заменить горизонтальным отрезком прямой (рис. 35), так чтобы заштрихованные площади оказались равными.

Уравнение приобретает вид

$$x^3 + ax + b = 0, \quad (24)$$

где a и b константы, зависящие от температуры и давления.

Это - поверхность катастрофы сборки.

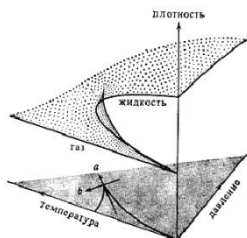


Рис. 31. Катастрофа в переходе жидкость-газ.

Замечание. Для описания фазовых переходов 1-рода используется аналогичная модель с потенциалом шестой степени.

Рассмотрим теперь явление ферромагнетизма.

Теория катастроф активно используется при описании процесса намагничивания ферромагнетика, остывающего ниже точки Кюри. Возникающая при этом спонтанная намагниченность образует ориентированные случайным образом крупные однородные области — домены, а при наличии достаточно сильного внешнего магнитного поля, вся намагниченность ориентируется по полю. Благодаря такому эффекту в горных породах фиксируется направление магнитного поля Земли, которое было в определенные моменты их становления. Так, в магматических породах, содержащих магнитные минералы, фиксируется момент их остывания ниже температуры Кюри, когда начинает проявляться ферромагнетизм.

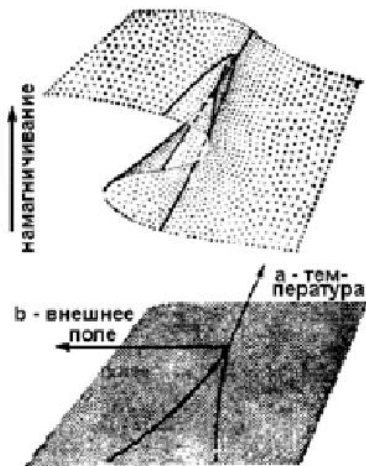


Рис. 32. Поверхность катастроф для ферромагнетизма.

При разрушении породы естественными процессами, мельчайшие частички оказываются намагниченными. Они переносятся реками и, в конце концов, осаждаются на дно океанов, морей и озер. В процессе медленного оседания в спокойной воде магнитные частички ориентируются по магнитному полю Земли. Таким образом, в последовательно накапливающихся слоях осадков, так же как и в последовательных порциях изливающихся и застывающих вулканических лав, как на магнитной ленте записывается история изменения взаимной ориентации земного магнитного поля и данного участка земной поверхности. Анализ таких записей по всей Земле позволил обнаружить как изменения магнитного поля, включающие его “переворачивания”, когда северный полюс становится южным и наоборот, так и перемещения и развороты крупных участков поверхности Земли.

При температуре более высокой, чем некоторая температура T_c , вещество может быть парамагнитным, а при более низкой - ферромагнитным. Ферромагнитное вещество намагничено (обладает связанным с ним магнитным полем) даже в отсутствие внешнего поля.

Уравнение состояния $x^3+ax+b=0$ характеризует поверхность сборки с точностью до диффеоморфизма с тождественной производной в точке Кюри. Термодинамический потенциал для фазового перехода второго рода с архетипом катастрофы сборки, управляется лишь двумя меняющимися связями (такими как P и T). Уравнение состояния здесь также $x^3+ax+b=0$. Можно показать, что в результате теплового возбуждения система может преодолеть К обсуждаемым здесь явлениям относится переход вещества в сверхпроводящее состояние. Сверхпроводимость возникает при охлаждении материала ниже определенной температуры, которая называется критической T_k . Величина этой температуры у каждого сверхпроводника своя (рис. 33.). В этой точке электрическое сопротивление скачком падает до нуля.



Рис. 33. Зависимость сопротивления материала (металла или керамики) от температуры.

Сверхпроводимость можно наблюдать у гелия ^4He . При понижении температуры жидкий HeI с нормальными свойствами переходит в сверхпроводящее состояние HeII . В момент сверхпроводящего перехода теплоемкость C гелия резко возрастает до огромной величины, а при дальнейшем охлаждении быстро уменьшается. График этой зависимости напоминает греческую букву λ (рис. 34).

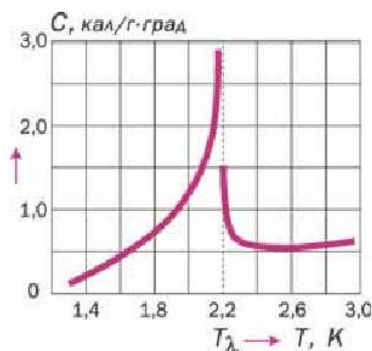


Рис. 34. Зависимость теплоёмкости от температуры при переходе гелия в сверхпроводящее состояние

2.8 Биология и экология

История развития животного мира на Земле часто интерпретируется, как эволюционное развитие, прерываемое серией катастроф.

Примером такого подхода является катастрофизм — система представлений об изменениях живого мира во времени под влиянием событий, приводящих к массовому вымиранию организмов. Теория катастроф происходит от древних мифов о потопах. Основываясь на смене видового состава живых организмов, Ж. Кювье пришёл к выводу, что в результате крупных катастроф планетного масштаба происходило вымирание живого на значительной части земной поверхности. Восстановление флоры и фауны происходило за счёт видов, пришедших из других небольших локальностей. Против идей Кювье середине XIX выступил Ч. Лайелла, сторонник эволюционного учения Ч. Дарвина. Представления о важной роли катастроф в эволюции живого возродились позже в виде неокатастрофизма.

Известна целая группа эволюционных теорий, согласно которым видообразование происходит очень быстро — в течение нескольких поколений (**Сальтационизм** (*saltus* — скачок) — группа эволюционных теорий,. Процесс связан с появлением новых особей, резко отличающихся ирепродуктивно изолированных от представителей родительского вида. Сальтационизм позволяет объяснить такие явления, как неполнота палеонтологической летописи — отсутствие непрерывных рядов переходных ископаемых форм между видами и надвидовыми таксонами; резкое снижение конкуренто- и жизнеспособности у переходных форм по сравнению с исходным видом и др.

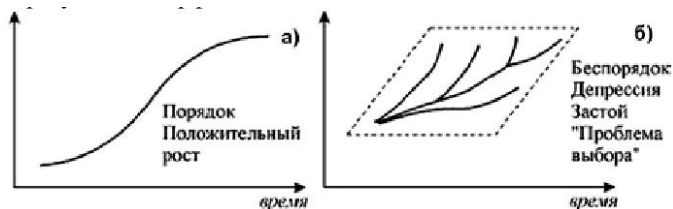


Рис. 35. Иллюстрация к понятиям «порядка» (а) и «беспорядка» (б).

Так, изучая наследование признаков у ослинника *Oenothera lamarckiana* Хуго де Фриз в 1901 г. наблюдал появление новых форм, морфологически резко отличающихся от родительских. На основании полученных результатов он сформулировал мутационную теорию, основным положением которой была внезапность появления новых, ранее не существующих видов в ходе единичных мутационных событий. В середине XX века Гольдшмидтом было сформулировано представление о системной мутации — это особый тип мутации, приводящий к появлению особей резко морфологически отличающихся от исходных форм и могущих дать начало новым видам. Системные мутации, возможно, связаны с изменением особых консервативных участков генома, ответственных за регуляцию морфогенеза.

Обычно в биологии в качестве «нормального», «стабильного» состояния рассматривается устойчивый рост (рис. 35а), для такого состояния системы разработана «нейтральная теория эволюции». Однако недавно молекулярная генетика прояснила роль стресса в эволюционном процессе.

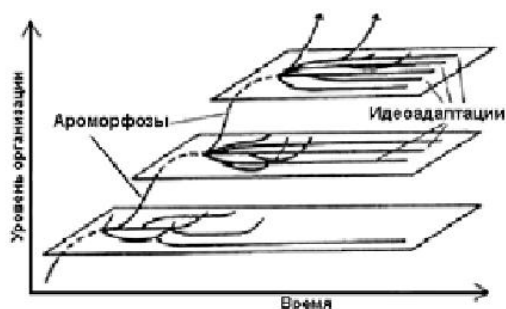


Рис. 36. Развитие уровня организации биологических систем: ароморфозы и идеоадаптация.

Дело в том, что ни один устойчивый рост не может продолжаться вечно. Простейшее логистическое уравнение описывает ограничение роста, связанное с истощением ресурса, как выход на стационар. На практике замедление роста в дальнейшем сопровождается депрессией, стагнацией, уменьшением характеристических показателей. В этой стадии система встает перед проблемой выбора другой стратегии жизни (другого ресурса). Если новый ресурс (новая жизненная стратегия) выбран правильно и действительно может обеспечить дальнейший активный рост, начинается новая стадия «устойчивого роста» типа А. Обе стадии А (ароморфозы) и В (идеоадаптации) являются «естественными» стадиями в развитии систем. В неблагоприятных условиях (на стадии беспорядка В) у микроорганизмов резко повышается скорость мутационного процесса. На дрозофилах было показано, что при стрессе у эукариот происходит скачкообразная реализация ранее накопленной, но скрытой генетической изменчивости, одновременно происходит ускорение процессов мутации.

Теория катастроф (модель катастрофы с ограничениями, применимая к областям, имеющим границы) позволила объяснить, почему пчёлы встречаются либо как виды, для которых характерен одиночный образ жизни, либо как общественные насекомые, образующие очень большие группы. Здесь используется один из основных экологических принципов: виды с меньшей эффективностью использования ресурсов среди конкурирующих за ту же самую пищу вытесняются под давлением естественного отбора. Если пчела собирает мед с небольшого пространства, способна летать с большой скоростью и переносить большое количество нектара, то она предпочитает жить в одиночестве или в небольшом коллективе. Слабые пчелы с низкой эффективностью сбора нектара, вынужденные к тому же собирать мед с обширных площадей, т.е. тратить большое время на перелёты, вынуждены образовывать большие сообщества (несколько тысяч), которые оказываются конкурентоспособными благодаря разделению труда в улье. Математика мёдоносных пчёл весьма интересна, и она стоит того, чтобы ей посвятить отдельную лекцию.

Перейдём теперь к рассмотрению проблемы роста популяции животных.

При углублении неравновесности в открытой системе возникает определенная последовательность бифуркаций, сопровождающаяся сменой структур. Состояние системы в момент бифуркации является неустойчивым и бесконечно малое воздействие может привести к выбору дальнейшего пути. Финальным состоянием эволюционирующих систем является состояние динамического хаоса.

Иллюстрацией перехода к нему является логистическое уравнение:

$$X_{n+1} = CX_n(1 - X_n) \quad (25)$$

Для наглядности рассмотрим биологическую трактовку этого уравнения: изолированно живёт популяция особей нормированной численностью X_n . Через год появляется потомство численностью X_{n+1} . Рост популяции описывается первым членом правой части уравнения — CX_n , где коэффициент C определяет скорость роста и является определяющим параметром. Убыль (за счёт перенаселенности, недостатка пищи и т.п.) определяется вторым, нелинейным членом — $(CX_n)^2$.

Линии показывают значения X_n при больших n . При $C < 1$ популяция с ростом n вымирает. В области $1 < C < 3$ численность популяции приближается к постоянному значению $X_0 = 1 - 1/C$. Это область стационарных решений. Затем в диапазоне $3 < C < 3.57$ появляются бифуркации, разветвление кривых на две. Численность популяции колеблется между двумя значениями, лежащими на этих ветвях. Сначала популяция резко возрастает, на следующий год возникает перенаселенность и через год численность снова становится малой. Далее происходит перекрывание областей различных решений, и поведение системы становится хаотическим. Динамические переменные X_n принимают значения сильно зависящие от начальных. М.Фейгенбаум установил универсальные закономерности перехода к динамическому хаосу при удвоении периода, которые были экспериментально подтверждены для широкого класса механических, гидродинамических, химических и т.д. систем. Наряду с последовательностями удвоений периода (каскадами Фейгенбаума) имеются другие пути перехода к хаосу, когда, например, длительные периоды упорядоченного движения чередуются со вспышками беспорядка.

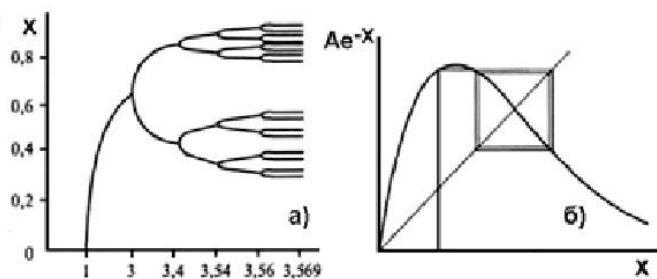


Рис. 37. Бифуркации в численности популяции: а – каскад удвоений периода; б – колебания численности популяции в модели Мальтуса.

и их гибель, является грибок *Ceratocystis ulmi*, который переносится от дерева к дереву жуками-короедами рода *Scolytus*. После 1927 г. в Англии произошло несколько вспышек этого заболевания, когда оно, очевидно, переходило от эндемической стадии к эпидемической. Типичный путь развития эпидемии начинается в точке А, для которой характерно большое число вязов на единицу площади и низкая численность популяции жуков.

Если популяция жуков увеличивается (например, в мягкие зимы), этот путь пересекает складчатую особенность в точке Т и скачком переходит в точку В эпидемической стадии, которой характерны наличие агрессивного штамма и гибель значительной части зараженных деревьев.

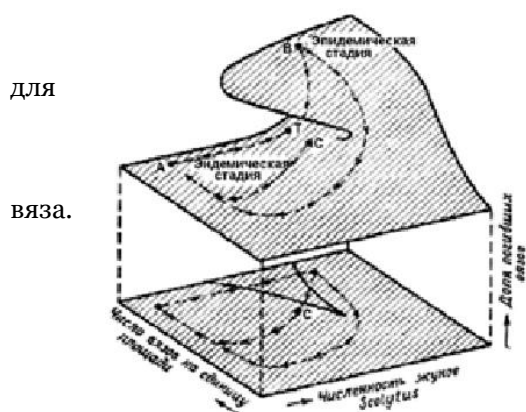


Рис. 38. Модель заболевания голландского вяза.

Из точки В система может двигаться двумя различными путями. Если в результате эпидемии или выборочной рубки число вязов на единицу площади существенно уменьшается и параллельно уменьшается численность жуков, то заболевание постепенно возвращается к эндемическому уровню. Если, однако,

вследствие соответствующей обработки или неблагоприятных условий популяция жуков резко сокращается прежде, чем существенно уменьшается численность вязов, то «путь» заболевания переходит через складку, совершая резкий переход в точку С эндемического уровня, причем скорость перехода зависит от размаха складки.

Перейдём теперь к проблемам экологии.

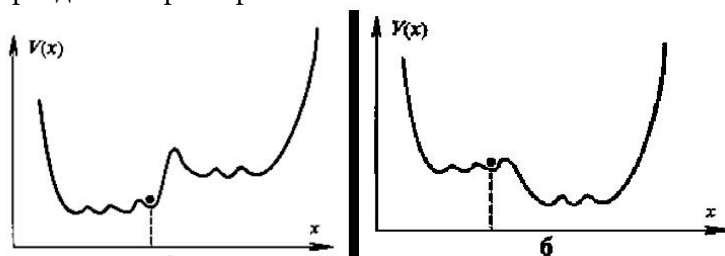


Рис. 39. Два типа потенциала: а - система устойчива; б - система неустойчива.

Экологическую обстановку можно представить в виде некоторой функции $V(x)$, или потенциала. В зависимости от его формы обстановка может обладать либо сравнительно большой (а), либо малой (б) устойчивостью. Здесь параметр x характеризует качество ситуации экологической точки зрения (например, среднее содержание вредных примесей в атмосфере). Пусть реализуемы только такие значения x , при которых некоторая функция (потенциал, рис. 44) принимает свое минимальное значение. Малые возмущения системы (малая загрязненность атмосферы) – устойчивое состояние находится в одной из точек локального минимума в нижней части графика.

Малые возмущения системы, обусловленные, например, деятельностью человека, могут лишь немного изменять загрязненность атмосферы – устойчивое состояние находится в одной из точек локального минимума в нижней части графика (система «сидит» в этой точке надежно). Перевод системы в опасное состояние – в соседний локальный минимум, соответствующий высокой загрязненности, – практически невозможен: нужен слишком большой толчок, заставляющий систему преодолеть высокий барьер, отделяющий точки минимума.

Однако при изменении условий (например, при накоплении отходов промышленного производства) характер зависимости потенциала от x может измениться. Тогда даже небольшой толчок может заставить систему «свалиться» в устойчивое состояние с высоким уровнем загрязненности атмосферы. Такой переход может совершиться очень быстро, в считанные годы.

2.9 Экономика

Надежды на то, что теория катастроф позволит определить механизм финансовых и экономических кризисов и банкротств не оправдались, но всё же этот подход позволил наглядно проиллюстрировать некоторые проблемы в экономике.

Катастрофические падения курсов акций на фондовых биржах можно описать моделью разрастающихся флуктуаций. Событие начинается с того, что приток нежелательной информации приводит к резкому падению цен акций всего нескольких крупных компаний. Этот сброс вызывает возрастающую панику среди брокеров, которые болезненно воспринимают любые колебания рынка, и к концу торгового дня лавинообразно катятся вниз цены акций многих тысяч иных, вполне благополучных компаний, а с ними и показатели всей биржи. Немаловажно и ожидание катастрофы (фактор самосбывающегося пророчества).

Введём функцию, характеризующую состояние экономики (например, величину дохода) в зависимости от какого-либо параметра (например, предприимчивость населения). Если экономика регулируется так, чтобы обеспечивать максимизацию функции, то система будет находиться в точке максимума *A* (рис.9) – оптимальное решение здесь единственно. По мере развития системы возникает побочный максимум *B* – новый локально-оптимальный, но вообще-то не наилучший режим. Он рождается вместе с близким локальным минимумом. Далее, побочный максимум обгоняет исходный (*C*). Начиная с этого момента, новый режим уже выгоднее старого. Но переход на него затруднён необходимостью резкого перескока - катастрофы. Отсюда вытекает правило: *При плавном переходе от одного локально-оптимального режима к другому необходимо временное ухудшение.*



Рис. 40. Сценарий глобальных перестроек в развивающейся системе. При плавном переходе от одного локально-оптимального режима к другому необходимо временное ухудшение.

В линейных системах малое изменение параметра в сторону лучшего режима улучшает положение. В отличие от этого, в стадии катастрофы, после достижения локального оптимума малые изменения управляющего параметра, направленные в сторону лучшего режима, не улучшают, а ухудшают ситуацию. И если, система стремится локально оптимизировать своё состояние, то она будет отвечать на недостаточно радикальные изменения возникновением сильных тенденций возврата к старому режиму. Этим объясняется неудача многих реформ. Наконец, в ходе дальнейшего развития системы исходное локально-оптимальное состояние вообще исчезает (*D*) и переход на далёкий от первоначального режим становится неизбежным (*E*).

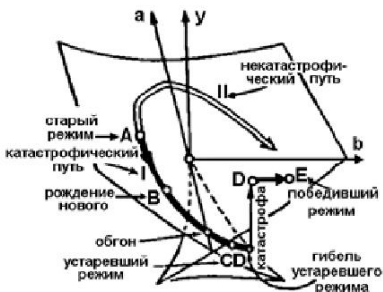


Рис. 41. Ласточкин хвост: универсальный закон зависимости оптимальных значений от параметров.

Важно понимать, что движение от худшего состояния в сторону лучшего сразу же приводит к ухудшению. Скорость ухудшения при равномерном движении к лучшему состоянию увеличивается. По мере движения от худшего состояния к лучшему сопротивление системы растёт. Максимум сопротивления достигается раньше, чем самое плохое состояние, через которое нужно пройти для достижения лучшего. После прохождения максимума сопротивления состояние продолжает ухудшаться. По мере приближения к самому плохому состоянию сопротивление, начиная с некоторого момента, начинает уменьшаться и, как только самое плохое состояние пройдено, не только полностью исчезает сопротивление, но система начинает "притягиваться" к лучшему состоянию. Слабо развитая система может перейти в лучшее состояние почти без предварительного ухудшения, в то время как развитая система, в силу своей устойчивости, на такое непрерывное улучшение неспособна. Если, однако, систему удастся сразу, скачком, а не непрерывно, перевести из плохого устойчивого состояния в состояние, достаточно близкое к лучшему, то дальше она сама собой будет эволюционировать в сторону лучшего состояния.

Все возможные сценарии взаимодействия двух локально-оптимальных режимов даются универсальным законом $y = x^4 + ax^2 + bx$ с параметрами a и b . На рис. 46 изображён график экстремального значения y как функции параметров a и b .

Сценарий перехода от одного состояния к другому изображается на графике путём I, заканчивающимся катастрофическим скачком. Однако к той же самой конечной цели можно

прийти без катастрофы, даже зайдя уже достаточно далеко по катастрофическому пути. Для этого надо вернуться назад и обойти разделяющую конкурирующие режимы точку с другой стороны (путь II).

2.10 Психология

Рассмотрение моделей поведения начнём с достаточно простой модели агрессивного поведения собаки. Эта модель предложена К.Зиманом, который основывался на работах психолога К. Лоренца. Согласно Лоренцу, конфликтными факторами, определяющими агрессивное поведение собаки, являются страх и ярость, степень интенсивности которых можно измерить. Поведение собаки Зиман описывает переменной x с диапазоном изменений от бегства до нападения и проходящей через нейтральное состояние. Предполагается, что зависимость агрессивности от ярости можно изобразить в виде монотонно возрастающей функции. Аналогично увеличение страха ведет к монотонному уменьшению агрессивности. При умеренном воздействии ($a > 0$) собака будет проявлять плавное изменение отклика с испуга на злость в зависимости от того, как было проведено воздействие. Но более высокий уровень воздействия — это стресс, соответствующий переходу в область $a < 0$. В этом случае если собака изначально испугалась, она останется испуганной при увеличении уровня воздействия на неё, пока в конечном итоге она не достигнет точки возврата, где произойдёт спонтанный переход в режим злобы. При переходе в этот режим собака будет оставаться озлобленной даже в случае постепенного снижения воздействия на неё. Если собака испытывает только сильный страх, то наиболее вероятное её поведение будет бегство. Если собака испытывает только сильную злобу, то она будет нападать. Каким будет её поведение, если она одновременно испытывает и страх, и ярость? Однозначно предсказать поведение в этом случае нельзя: она может и нападать, и обращаться в бегство: нет каких-либо видимых признаков, по которым можно было бы судить об её поведении в следующий момент. Более того, при одних и тех же значениях показателей страха и ярости животное могло повести себя совершенно по-разному. В этом случае имеет место бимодальность в поведении. На основе этих закономерностей поведения, Зиман делает вывод, что зависимость поведения собаки от этих двух параметров (страха и ярости) можно изобразить трёхмерным рисунком катастрофы "сборка" (рис. 47). Катастрофы (резкие скачки в поведении) будут соответствовать в этом случае нападению и бегству собаки.

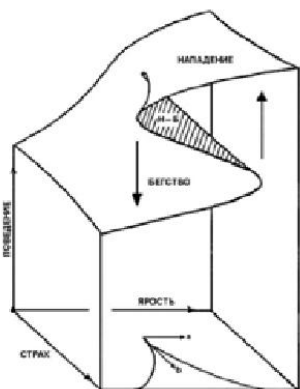


Рис. 42. Поверхность состояния собаки, характеризующая зависимость агрессивности собаки от «количества» гнева и страха. Подобные поверхности неоднозначны, то есть любому сочетанию переменных соответствует несколько положений — состояний собаки.

В том случае, когда страх и ярость возбуждаются одновременно, поведение собаки может «пойти» по верхней — агрессивной — или по нижней — «трусливой» — частям катастрофической складки, и её поведение будет полностью определяться с самого начала сделанным «выбором». Поэтому возбужденное животное скорее склонно броситься кусаться или обратиться в бегство, нежели пребывать в состоянии пассивной нейтральности. Катастрофа сборки иллюстрирует не только агрессивное, но и другие виды эмоционального поведения. Любое поведение определяется, в конечном счете, нейронной активностью мозга. Возможно, активность мозга на нейронном уровне удастся описать методами теории катастроф. Модель катастрофы сборки также годится для описания поведения особей, стоящих как выше, так и ниже в эволюционном развитии, чем собака. В частности, предложена модель агрессивного поведения тропических рыб по захвату территории для постройки убежища, а также модели эмоционального поведения человека в некоторых конфликтных ситуациях. Были попытки применить теорию катастроф для описания творческого процесса ученого.

Будем характеризовать творческую личность (например, учёного) тремя параметрами, называемыми «техника», «увлеченность», «достижения», между которыми существует некая зависимость, которую можно представить в виде поверхности в трёхмерном пространстве с координатами (Т, Д, У). При проектировании этой поверхности на плоскость (Т, У) вдоль оси Д возникает особенность — сборка. Рассмотрим достижения учёного в зависимости от его увлечённости и технической возможности. Если увлеченность невелика, то достижения монотонно и довольно медленно растут с техникой. Если увлеченность достаточно велика, то наступают качественно новые явления. В этом случае достижения с ростом техники могут расти скачком (такой скачок будет, например, если техника и увлеченность меняются вдоль кривой на рис. 48 в точке 2). Область высоких достижений, в которую мы при этом попадаем, обозначена словом «гении». С другой стороны, рост увлеченности, не подкреплённый соответствующим ростом техники, приводит к катастрофе (на кривой 3 в точке 4, рис. 43), при которой достижения скачком

падают, и мы попадаем в область обозначенную словом «маньяки». Интересно, что скачки из состояния «гений» в состояние «маньяк» и обратно происходят на разных линиях, так что при достаточно большой увлеченности гений и маньяк могут иметь равные увлеченности и техники, различаясь лишь достижениями (и предысторией).

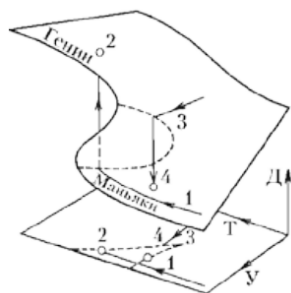


Рис. 43. Геометрическое описание творчества учёного в координатах его достижений (Д), увлеченности (У) и владения техникой исследований (Т).

2.11 Социологическое моделирование

В социальной психологии теорию катастроф использовали в изучении социального поведения, социальной установки и т.д. Примером является исследование нарушений режима в тюрьме Гартри в 1972 г., проведенное Зиманом. Оказалось, что факторы, влияющие на беспорядки, могут быть разделены на две в основном независимые группы:

- Напряженность - чувство разочарования и безвыходности, бедственное положение;
- Разобщенность - взаимная отчужденность, отсутствие общения, разбиение на два лагеря.

При плавном ухудшении условий содержания заключенных количество протестных акций и насильственных действий против охраны и конвоя изменяется нерегулярным и скачкообразным образом. Функция, связывающая вероятность бунта с такими величинами, как средняя продолжительность ежедневной прогулки, калорийность суточного рациона, вероятность заключения в карцер, непрерывна и даже довольно гладкая. Но у нее есть особенности типа сборки, вблизи них и происходят «катастрофы».

С ростом напряженности повышается вероятность волнений, а увеличение разобщенности ведёт к тому, что волнения принимают характер более внезапных и яростных вспышек. Это заставляет подумать о катастрофе сборки (рис. 49). Система вначале "садится" по вертикали на многообразие катастрофы ("быстрый поток"), а затем подчиняется обратной связи ("медленный поток"). Из рис. 49 видно, что при низких значениях разобщенности система стремится к устойчивому положению умеренного волнения, но при высоком уровне разобщённости она совершает колебания внутри бифуркационного множества катастрофы сборки, прыгая попеременно с верхнего листа на нижний и обратно. Эта картина будет отчасти смазываться случайным шумом, но колебательный характер поведения, тем не менее, должен проявиться.



Рис. 44. Катастрофа тюремного бунта.