



**ОЧЕРКИ ПО ИСТОРИИ ДИНАМИЧЕСКОГО ХАОСА**  
**Исследования в СССР в 1950–1980-е годы**

*Р.Р. Мухин*

© Р.Р. Мухин, 2007  
© Издательство «Вест-Консалтинг», 2007  
Москва: «Вест-Консалтинг», 2007. 354 с.  
ISBN 978 5-903321-17-9

**Содержание**

**Предисловие**

**Введение**

**Глава I. Предыстория динамического хаоса: физические корни и истоки исследований систем со сложным поведением (1880–1940-е годы)**

- 1.1.** Точка отсчета – качественные методы. А. Пуанкаре и А.М. Ляпунов (1881–1918 гг.).  
1.1.1. Качественная теория дифференциальных уравнений. 1.1.2. Вопросы устойчивости. 1.1.3. Фигуры равновесия вращающихся жидкостей. Бифуркации. 1.1.4. Ж. Адамар и геодезические потоки на поверхностях отрицательной кривизны (1898 г.)  
**1.2.** Дж. Биркгоф. Теория динамических систем. Теория нелинейных колебаний. Школа А.А. Андронова. 1.2.1. Дж. Биркгоф и теория динамических систем. 1.2.2. Начальный период исследований динамических систем в СССР. 1.2.3. Теория нелинейных колебаний. Школа А.А. Андронова  
**1.3.** Начальный период эргодической теории. Работы Н.С. Крылова. 1.3.1. Истоки эргодической теории. Первые эргодические теоремы. 1.3.2. Работы Н.С. Крылова по обоснованию статистической механики  
**1.4.** Развитие теории турбулентности. 1.4.1. Статистическая теория турбулентности. Теория А.Н. Колмогорова. 1.4.2. Зарождение турбулентности. Линейная теория гидродинамической неустойчивости В. Гейзенберга.

**Глава II. Теория динамических систем (1950–1980-е годы)**

- 2.1.** Теория Колмогорова–Арнольда–Мозера (теория КАМ). 2.1.1. Предварительные замечания. 2.1.2. Состояние «основной проблемы» динамики до работ Колмогорова (1954 г.). 2.1.3. Формулировка Колмогоровым основных положений теории КАМ (1954 г.). 2.1.4. Проблема доказательства: Ю. Мозер и В.И. Арнольд. Первые применения теории КАМ. 2.1.5. Программа А.Н. Колмогорова

- 2.2. Эргодическая теория. Гиперболические системы. 2.2.1. К-системы и метрическая энтропия. Развитие энтропийного направления эргодической теории. 2.2.2. Гиперболические системы. Работы С. Смейла и Д.В. Аносова (1960-е гг.)
- 2.3. Теория бифуркаций. Гомоклинические структуры. 2.3.1. Теория бифуркаций. 2.3.2. Гомоклинические структуры. Работы С. Смейла, Ю.И. Неймарка, Л.П. Шильникова, В.К. Мельникова, В.И. Арнольда (1960–1970-е гг.)
- 2.4. Алгоритмическая сложность

### **Глава III. Хаос в гамильтоновых системах (конец 1950-х–1980-е гг.)**

- 3.1. Новые задачи теории нелинейных колебаний. Стохастическая неустойчивость. 3.1.1. Начало исследований. Критерий Чирикова. 3.1.2. Проблема Ферми–Паста–Улама. Задача об ускорении Ферми. 3.1.3. Интерпретация ФПУ-проблемы Б.В. Чириковым и Ф.М. Израилевым. 3.1.4. Вычислительный эксперимент
- 3.2. Проблема зарождения хаоса. Стохастический слой. Стандартное отображение.
- 3.3. Слабый хаос и стохастическая паутина. 3.3.1. Диффузия Арнольда. 3.3.2. Паутина Заславского
- 3.4. Биллиардные задачи. Квазислучайная динамика. 3.4.1. Гиперболические биллиарды. Работы Я.Г. Синая. 3.4.2. Квазислучайная динамика в финальных движениях в задаче трех тел (В.М. Алексеев, 1960-е гг.)

### **Глава IV. Диссипативный хаос (1960–1970-е гг.)**

- 4.1. Лазерный аттрактор (1963 г.)
- 4.2. Состояние вопроса о возможности хаоса в маломерных диссипативных системах к началу 1970-х годов.
- 4.3. Аттрактор Лоренца и другие аттракторы. 4.3.1. Аттрактор Лоренца. Работа В.С. Афраймовича, В.В. Быкова и Л.П. Шильникова. 4.3.2. Квазиаттракторы. Отображение Заславского
- 4.4. Теория турбулентности, новые подходы, новые надежды (1960–1970-е гг.) 4.4.1. Плазменная турбулентность. 4.4.2. Гидродинамическая турбулентность. Сценарии перехода к хаосу
- 4.5. Особенности открытия динамического хаоса

### **Глава V. Многообразие аспектов феномена хаоса**

- 5.1. Хаос и неинтегрируемость. 5.1.1. Интегрируемые системы. Переход к неинтегрируемости. 5.1.2. Неинтегрируемость в гамильтоновых системах. 5.1.3. Качественное интегрирование в диссипативных системах
- 5.2. Методологические аспекты динамического хаоса
- 5.3. Динамический хаос: взаимодействие физического и математического аспектов
- 5.4. Динамический хаос и случайность
- 5.5. Хаос и самоорганизация. 5.5.1. Нелинейное уравнение диффузии. 5.5.2. Структуры и хаос в планетных кольцах и галактиках

### **Заключение**

#### **Приложение I. Хронология событий хаоса**

**Приложение II.** Научные центры, в которых получены основные результаты, связанные с хаотической динамикой

### **Литература**

## **Предисловие**

История развития теории и обнаружения явления, называемого сейчас хаосом, можно отнести к драматическим страницам истории развития науки. Явление хаоса, или просто

хаос, было обнаружено как решение уравнений динамики, известных более 300 лет. Хотя отдельные работы, сыгравшие фундаментальную роль в понимании хаоса, появились в начале 20 века, теория хаоса начала формироваться в 50-е годы. Она сопровождалась многочисленными открытиями в теории в приложениях: в плазме, оптике, гидродинамике, распространении волн в атмосфере и океане, баллистике и др. Сейчас трудно найти область, где бы явление хаоса не играло ту или иную значительную роль. Развитие компьютерной техники было решающим в понимании хаоса, с одной стороны, и стимулировало новые идеи в теории коммуникаций, с другой стороны.

Оглядываясь назад, трудно себе представить каким образом, такое большое число работ и книг по теории нелинейных явлений и хаоса было написано всего лишь за несколько десятков лет. Вклад ученых России особенно выделяется в этой области. Нет сомнений, что охватить огромный материал истории развития хаоса, когда такое большое количество открытий, идей и экспериментальных результатов появляется в короткое время, является задачей невероятной сложности. Тем не менее, автор этой книги, Равиль Мухин, не только решился взяться за эту работу, но и сумел представить читателем обширную картину исследований в теории хаоса с ее трудностями, кризисами, успехами, и торжеством открытий.

Эта книга – первая в своем роде. В таком деле неизбежны недостатки, присутствует, как и в любой истории, личное и порой неоднозначное восприятие автора, но безусловны и неоспоримы достоинства. Я думаю, что читатели разделят со мной благодарность автору, выполнившему столь сложную работу на столь высоком уровне.

*Георгий М. Заславский  
Нью-Йоркский Университет*

Осознание фундаментальности проблемы динамического хаоса научным сообществом физиков пришло в начале – середине 1980-х гг., через 20 лет после открытия самого явления. Так, в знаменитом списке «особо важных и интересных проблем физики и астрофизики» В.Л. Гинзбурга она появляется только в 4-ом издании соответствующей статьи (1985); в трех же предыдущих изданиях (1971, 1974 и 1980) эта проблема отсутствует. В настоящее время она, будучи сформулированной несколько более широко («Нелинейная физика. Турбулентность. Хаос. Странные аттракторы»), отнесена к разделу «Макрофизика» и находится в упомянутом списке под одиннадцатым номером. Комментируя это обстоятельство, В.Л. Гинзбург замечает: «...Ситуация радикально изменилась. В физической литературе почти всех рангов публикуются (и в немалом количестве) статьи, посвященные солитонам, динамическому хаосу, странным аттракторам и т.д.» [1. С. 63]. Действительно, как раз в начале и середине 1980-х гг. возникает своего рода «хаотический бум», появляется целая серия ныне широко известных монографий и сборников по динамическому хаосу (книги Г. Хакена, А. Лихтенберга и М. Либермана, Г. Шустера, М.И. Рабиновича и Д.И. Трубецкова, Г.М. Заславского и др.). Научно-популярный бестселлер Дж. Глейка «Хаос: создание новой науки» увидел свет чуть позже, в 1987 г. В эти годы вдруг становится ясно, что динамический хаос чрезвычайно распространен в физике и вообще в естественных науках. Вот области, в которых он играет важную роль: лазеры, нелинейная оптика, ускорители заряженных частиц, задача трех тел в небесной механике, некоторые химические реакции, динамика популяций и т.д. Можно сказать, что динамический хаос стал неким ядром, сердцем обширной науки, получившей название нелинейной динамики, и тесно связанной с ней синергетики (или теории самоорганизации).

В монографии Р.Р. Мухина рассказывается о сложных путях развития целого комплекса идей и теорий, математических конструкций и концепций, которые, в конце концов, привели к открытию явления динамического хаоса в 1960-е гг. Само это открытие было по структуре весьма сложным и относительно независимо было сделано для двух классов динамических систем: консервативных (или гамильтоновых) и диссипативных. Книга написана в жанре историко-научного исследования, находящегося на стыке историй физики, механики,

математики. Основные события при этом происходили в теории нелинейных колебаний и теории динамических систем. Страницы книги пестрят формулами, и это означает, что она не является научно-популярной. Несмотря на это, она написана ясно, увлекательно, включает философско-методологические экскурсы.

Повествуя о сложных путях формирования концепции динамического хаоса, основное внимание автор уделяет весьма весомому, но менее известному вкладу отечественных ученых. Решающий прорыв, приведший к открытию явления, свершился в золотые для советской науки 1950–1960-е годы, о которых немало говорится в книге [1]<sup>1</sup>. Автору удалось связаться с некоторыми из первооткрывателей и взять у них интервью или получить от них ценные свидетельства, что значительно оживило и украсило его работу.

Мне представляется очень интересными и во многом новыми методологические размышления автора (в связи с динамическим хаосом) о взаимосвязи математического и физического аспектов, о соотношении понятий порядка и хаоса, необходимости и случайности, устойчивости и неустойчивости, о своего рода «нелинейной революции» в естествознании.

Но наибольшее впечатление на меня произвело то, что глубокие концептуальные сдвиги в науке могут происходить без изменения теоретического фундамента, основных уравнений, на уровне лишь следствий этих исходных уравнений, что убедительно демонстрирует автор на примере явления динамического хаоса.

Историку точного естествознания и математики всегда приятно видеть в числе главных героев исторического процесса, ведущему к замечательному открытию, такие славные имена как А. Пуанкаре и А.М. Ляпунов, Дж. Биркгоф и А.А. Андронов, А.Н. Колмогоров и др. В Приложении автор, как это и подобает профессиональному историку науки, дал хронологию основных событий, привел список наиболее важных научных центров изучения динамического хаоса.

Естественно, Р.Р. Мухин не исчерпал «хаотическую тематику» и кое-что оставил на будущее. Так, в книге только в малой степени затронута экспериментальная сторона явления. Думаю, что затраченные читателем усилия на освоение, скажем, КАМ-теории, теорий турбулентности и других насыщенных математикой разделов книги, в конечном счете, будут вознаграждены: перед ним приоткроются двери в прекрасную «новую науку». Думаю, что и специалисты по нелинейной динамике и ее приложениям найдут в книге Р.Р. Мухина немало нового и интересного.

## Литература

1. Гинзбург В.Л. О физике и астрофизике. 2-е изд., переработанное и дополненное. М.: Наука, 1992.
2. Научное сообщество физиков СССР. 1950–1960-е годы: документы, воспоминания, исследования. Вып. 1 / Сост. и ред. В.П. Визгин и А.В. Кессених. СПб.: РХГА, 2005.
3. Научное сообщество физиков СССР. 1950–1960-е и др. годы: документы воспоминания, исследования / Сост. и ред. В.П. Визгин и А.В. Кессених. СПб.: РХГА, 2007 (в печати).

*В.П. Визгин*

---

<sup>1</sup>Физике этого периода посвящены два выпуска книги [2, 3]. В первом из них помещена большая статья Р.Р. Мухина по истории нелинейной динамики и, в частности, динамического хаоса.