

I. БИОМЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ И СИНЕРГЕТИКА

DOI: 10.12737/2306-174X-2023-1-5-20

ПОРЯДОК – ХАОС, АСИМПТОТИКА – СИНЕРГЕТИКА, КЛАССИКА – ПОСТНЕКЛАССИКА: ВЗГЛЯД ЭКОЛОГА

Г.С. РОЗЕНБЕРГ

*Институт экологии Волжского бассейна РАН – филиал
Самарского федерального исследовательского центра РАН,
ул. Комзина, 10, Тольятти, Россия, 445003*

Аннотация. Обсуждаются основные понятия синергетики, соотношение представлений о «порядке» и «хаосе» (пример возникновения детерминированного хаоса в модели растительного сообщества на ранней стадии сукцессии). Рассмотрены идеи асимптотического упрощения с экологическими примерами и интерпретациями (уменьшение размерности системы, регулярные асимптотики, линеаризация, усреднение, континуализация). Сопоставлены три парадигмы познания мира.

Ключевые слова: сложная система, системология, третья парадигма, асимптотология, линеаризация, научная рациональность.

ORDER - CHAOS, ASYMPTOTICS - SYNERGETICS, CLASSICS - POST-NON-CLASSICS: AN ECOLOGIST'S VIEW

G.S. ROZENBERG

*Institute of Ecology of the Volga River Basin of the RAS – branch Samara Federal
Research Center of the RAS, Komzin st., 10, Togliatti, Russia, 445003*

Abstract. The basic concepts of synergetic, the relationship between the concepts of "order" and "chaos" are discussed (an example of the appearance of deterministic chaos in a model of a plant community at an early stage of succession). The ideas of asymptotic simplification with ecological examples and interpretations (dimension reduction of the system, regular asymptotic, linearization, averaging, continualization) are considered. Three paradigms of knowledge of the world are compared.

Key words: complex system, systemology, third paradigm, asymptotology, linearization, scientific rationality.

*У Некрасова... на его письменном столе был какой-то хаос.
Но Некрасов в этом хаосе находил всегда, что ему было нужно,
и приходил в отчаяние, когда Петр приводил в порядок его
письменный стол.*

Авдотья Яковлевна Панаева (1819-1893),
писательница [1, с. 365].

*Синергетика обретает сейчас статус вестника новой
парадигмы. Разрешая фундаментальную оппозицию порядок –
хаос через творчество саморазвития, она вводит в научный
оборот представление о неоднозначности путей эволюции,
о неполноте бытия, об открытой методологии.*

Игорь Васильевич Андрианов (г. р. 1948)
с коллегами, математик [2, с. 211].

Введение. Синергетика как наука о самоорганизации вбирает в себя различные области знаний. Не миновала «чаша сия» и

экологию [3]. Но, прежде всего, договоримся о терминологии. **Аттрактор** (англ. *attract* – привлекать, притягивать) – множе-

ство точек в фазовом пространстве динамической системы, к которым стремятся траектории системы. Если траектория прошла достаточно близко к аттрактору, то со временем она уже не покинет окрестность аттрактора и даже будет подходить к нему всё ближе и ближе, т. е. будет наблюдаться *эффект притяжения к аттрактору*. **Странный аттрактор** – это аттрактор, не являющийся регулярным. Сам термин (англ. *strange attractors*) был предложен в работе [4]. Среди странных аттракторов часто встречаются *хаотические аттракторы*, в которых прогнозирование траектории, попавшей в аттрактор, затруднено, поскольку малая неточность в начальных данных через некоторое время может привести к сильному расхождению прогноза с реальной траекторией. Непредсказуемость траектории в детерминированных динамических системах называют **детерминированным (динамическим) хаосом**, отличая его от *стохастического хаоса*, возникающего в стохастических динамических системах. Детерминированный хаос – это «нерегулярное, или хаотическое, движение, порожденное нелинейными системами, для которых динамические законы однозначно определяют эволюцию во времени состояния системы при известной предыстории» [5, с. 240]. Это явление также называют *эффектом бабочки* (англ. *butterfly-effect*), подразумевая возможность преобразования слабых турбулентных потоков воздуха, вызванных взмахом крыльев бабочки в одной точке планеты в мощное торнадо на другой её стороне вследствие многократного их усиления в атмосфере за некоторое время. **Асимптота** (от греч. *asymptotos* – несовпадающий) – т. н. прямая или кривая линия, которая, будучи продолжена, приближается к другой кривой, но никогда не пересекает её, так что расстояние между ними делается бесконечно малой величиной. Понятие асимптоты играет важную роль в математическом анализе; но еще больше роль асимптотического приближения как методологического принципа, открывающего путь к углубленному пониманию и декомпозиции сложных систем. Именно в таком контексте и предложил американский математик М. Крускал [Martin David Kruskal; 1925–2006; [6)] понятие

«асимптотология» (иногда, – *«асимптотология»*), закрепляя за ним возможность рассмотрения с единых позиций любых асимптотических явлений, в какой бы области естествознания они не наблюдались [2, 7].

Порядок – хаос

Соотношение представлений о «порядке» и «хаосе» всегда привлекало философов и естествоиспытателей. Еще Аристотель (др.-греч. *Ἀριστοτέλης*; 384 до н. э.— 322 до н. э.) ссылается на Гесиода (др.-греч. *Ἡσίοδος*; между 750 и 650 гг. до н. э.; в одно время с Гомером), который «правильно говорит, делая первым Хаос. Он говорит: "Прежде всего возник Хаос, а уж затем Гея широкогрудая...", как если бы существующим [вещам] надлежало сначала предоставить пространство, ибо он, как и большинство [людей], считал, что все [предметы] находятся где-нибудь и в [каком-нибудь] месте». [8, с. 124]. «Мир или стройный порядок или же смешение и путаница», писал римский император и философ-стоик Марк Аврелий (121–180; [9, с. 92]). И еще одна цитата (современные представления): «Разрушение классического механицизма и развитие таких теорий, как квантовая механика, статистическая физика, неравновесная термодинамика и особенно синергетика, рождение геометрии или грандиозная картина мироздания, нарисованная в "Математических началах натуральной философии" Ньютона, способствовали обращению науки к парадигме хаоса и попытке выработать рациональное описание хаоса как феномена» [10, с. 5]. При этом, сложились двуединые представления: самоорганизация есть результат синтеза хаоса и порядка: хаос возникает из порядка, а порядок – из хаоса.

Феномен детерминированного (динамического) хаоса, т. е. проявление хаотического поведения в динамических системах с малым числом степеней свободы, стал активно изучаться математиками во второй половине прошлого столетия. Одним из открытий этого периода стало обнаружение Лоренцом (Edward Norton Lorenz; 1917–2008 [11]) сложного поведения сравнительно простой динамической системы из трех

обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка с квадратичными нелинейностями. При определенных значениях параметров траектория этой системы вела себя столь запутанным образом (*странный аттрактор*), что внешний наблюдатель мог бы принять её характеристики за случайные. Поведение системы Лоренца может быть описано *асимптотическими траекториями*, спирально приближающимися к устойчивым точкам, петлеобразными траекториями, перерождением петель в неустойчивые предельные циклы, возникновением сложно устроенных траекторий, не являющихся аттракторами и, наконец, собственно, странными аттракторами [12].

«Открытие явления динамического хаоса существенно меняет взгляд на саму процедуру сравнения предсказаний теории с экспериментом, постановку ряда задач управления сложными системами. В самом деле, раньше, если экспериментальная кривая $x(t)$ расходилась с теоретической $y(t)$, то можно было заключить, что теория не описывает эксперимент. Теперь, после открытия динамического хаоса, стала видна еще одна возможность, – модель хороша, но исходная система обладает чувствительностью к начальным данным... в этом случае нельзя "поточечно", на одни моменты времени сравнивать траекторию, даваемую моделью, и самим объектом. Нужно сравнивать некоторые функционалы на траектории. Чувствительность к начальным данным означает, что малые воздействия могут существенно изменить траекторию через некоторое, может быть весьма небольшое, время. Малые причины в таких системах могут иметь большие следствия» [13].

Растительное сообщество на ранней стадии сукцессии. Изменение количественного соотношения популяций растений в ходе восстановительной сукцессии (зарастание антропогенных отвалов, пожарищ, залежей и т. д.) на её ранних стадиях имеет вид стохастического процесса. Этому явлению может быть дано несколько объяснений. В частности, на ранних этапах сукцессий, когда растительный покров еще

не сомкнут, конкурентные взаимоотношения между растениями играют не столь важную роль [14], популяции находятся под воздействием множества случайно влияющих факторов, что и определяет случайный (и практически независимый) характер динамики популяций. Однако, можно дать и другое объяснение этому феномену, исходя из анализа строго детерминированной математической модели [15].

Рассмотрим динамику трехвидового сообщества, где $x(t)$, $y(t)$ и $z(t)$ – численности видов в момент времени t . Будем различать виды по типу их эколого-ценотических стратегий (ЭЦС; см.: [16, 17]): виды x и y – это С-стратеги (конкуренты), z – R-стратег (рудерал); первые характеризуются мощным конкурентным подавлением соперников и способностью доминировать в сообществе, второй – не отличается устойчивостью к стрессовым ситуациям, обладает низкой конкурентной мощностью, но способен при отсутствии конкуренции быстро захватывать пространство (высокая скорость размножения). Эти представления позволяют записать следующую модель динамики такого сообщества:

$$\begin{aligned} dx/dt &= a_1x - b_1y \cdot \ln z \\ dy/dt &= a_2y - b_2x \cdot \ln z \\ dz/dt &= a_3z - b_3xy z, \end{aligned}$$

где a_i – коэффициенты естественного прироста видов, b_i – коэффициенты межвидовых взаимоотношений, ограничивающих рост.

Выбор логарифмической зависимости при описании взаимодействия видов-конкурентов с видом-рудералом продиктован значительно меньшей конкурентной мощностью последнего (кроме того, подобный прием уже использовался в одной из модификаций модели конкуренции [18]. Отсутствие ограничивающих воздействий самих видов на свой рост (внутривидовой конкуренции) связан с тем, что моделируется ранняя стадия сукцессии, когда эти взаимодействия слабы и ими можно пренебречь. Легко показать, что эта модель имеет неустойчивую точку равновесия:

$$x_0 = \left(\frac{b_1 a_2 a_3^2}{a_1 b_2 b_3^2} \right)^{1/4}, \quad y_0 = \left(\frac{a_1 b_2 a_3^2}{b_1 a_2 b_3^2} \right)^{1/4}, \quad \ln z_0 = \left(\frac{a_1 a_2}{b_1 b_2} \right)^{1/2}$$

и путем простого преобразования ($\ln z = a_3 w$) с точностью до коэффициентов сводится к модели со странным аттрактором [19]. Таким образом, строго детерминированная модель будет иметь «стохастические» поведение, что позволяет объяснить случайный характер доминирования того или иного вида на разных стадиях сукцессии.

Анализ многочисленных моделей динамических систем привел к выводу о том, что упорядоченное поведение – это «островки порядка в море хаоса». Именно в таком отношении находятся соответствующие «порядку» и «хаосу» притягивающие области фазового пространства, аттракто-

ры, на фазовых портретах большинства моделей реальных динамических (в т. ч. и экологических) систем [20].

Среди высказываний удивительного голландского художника М. Эшера (Maurits Cornelis Escher; 1898-1972) находим такие: «Мы обожаем хаос, потому что любим наводить порядок» или «Порядок – это повторение элементов. Хаос – многообразие без ритма». На рис. 1 представлена литография «Порядок и хаос», где роль порядка «играет» малый звездчатый додекаэдр (впервые был опубликован на страницах кеплеровской "Гармонии мира – Harmonices Mundi ", 1619); мусор вокруг – это и есть образ «хаоса».



Рис. 1. Литография «Порядок и хаос» (1950); 28 x 28 см.

Подводя итог размышлениям на тему «порядок – хаос» можно констатировать, что существование странных аттракторов в фазовом пространстве феноменологических моделей экосистем заставляет по-иному взглянуть и на саму природу стохастичности изменения характеристик экосистем во времени. При этом возникает интересная

задача нахождения статистики поведения системы по известной структуре странного аттрактора (своего рода, аналог закона распределения для случайной величины).

Асимптотика – синергетика

Наличие странных аттракторов в сравнительно простых феноменологических моделях динамических систем, по видимому, должно рассматриваться как принципиальное препятствие на пути построения долгосрочных, не вероятностных прогнозов, когда даже незначительное изменение начальных условий может полностью изменить прогноз (*butterfly-effect* [2, 21-24]). Выходом из этой сложной ситуации может стать выбор наиболее адекватного (оптимального для некоторой цели) метода. «Асимптотические методы служат для упрощения постановки и решения задач математического моделирования вблизи особенностей, и точность их возрастает по мере приближения к особенности. Термин "асимптотология" ввел 40 лет назад М. Крускал¹ (1963; [6]; и прошло еще 20 лет... – Г.Р.), определив его как искусство обращения с прикладными математическими системами в предельных случаях. Превращение этого искусства в науку ведет к появлению асимптотической математики, той мягкой математики, в которой нуждаются биология, социология, синергетика. С последней их роднит динамизм методов, устремленных к жизни: от предела – к приближению, от бытия – к становлению, от полноты – к целостности» [2, контртитул]. Вот только несколько идей (см. главу 2 в работе [2]) асимптотического упрощения с экологическими примерами и интерпретациями.

Уменьшение размерности системы. Очень часто забывают, что для сложных систем, коими являются и экосистемы, совмещение в рамках одной модели *объяснительной* и *прогностической функций* затруднено, а чаще всего, невозможно [25-28]. Если мы возьмем хорошую (с высокой прогностической способностью) имитационную модель некоторой экосистемы (например, модель лугового сообщества [29]) и сможем, некоторым образом, упоря-

дочить все факторы воздействия и взаимодействия, то обнуляя по очереди соответствующие коэффициенты, мы придем к простейшим моделям вольтерровского типа «хищник–жертва» или конкуренции, т. е. к моделям, призванным выполнять функцию объяснения.

Регулярные асимптотики, линеаризация. Иногда, отклонения прогнозных значений от реальных оказывается на всю «глубину прогноза» не очень значительным; это бывает, например, при наличии систематической ошибки измерения или в ситуации, когда параметры моделируемой системы претерпевают незначительные изменения. В последнем случае можно, например, скорректировать модель, учитывая в ней еще некоторые воздействующие факторы. «Планету Земля можно описать как шар, как эллипсоид и как геоид: и первое, и второе, и даже третье описания приближительны, хотя точность их возрастает. Но не надо думать, что чем точность выше, тем описание лучше: подлинную революцию произвело именно представление о Земле как о шаре и, скорее всего, это представление навсегда останется "самым главным"» [30, с. 118].

Линеаризация – один из методов приближенного представления замкнутых нелинейных систем, при котором исследование нелинейной системы заменяется анализом линейной системы, в некотором смысле эквивалентной исходной. В качестве примера укажу на математическую модель динамики фитопланктонных популяций и трансформаций форм фосфора, азота и кремния, учитывающую влияние солености и температуры на развитие трех видов фитопланктона, поглощение фитопланктоном фосфатов и форм азота, переход форм фосфора и азота из одной в другую, а также поглощение кремния диатомовыми водорослями [31]. Для облегчения анализа (повышения эффективности объяснительной функции) этой системы была выполнена линеаризация нелинейных функций источников и получены достаточные условия единственности решений взаимосвязанных по начальным и конечным условиям цепочек начально-краевых задач. полученные результаты «позволяют глубже понять био-

¹ Martin David Kruskal (1925–2006) – американский физик-теоретик и математик, брат William Kruskal (1919-2005), статистика, известного благодаря тесту Крускала–Уоллиса. Был одним из пионеров *теории солитонов* и предложил сам термин «солитон» (уединенная волна в нелинейной среде).

геохимические процессы, происходящие в мелководных замкнутых морях и прибрежных системах» [31, с. 6].

Усреднение. Основная идея этого метода – разделение быстрых и медленных составляющих решения. В качестве примера приведу процедуру выравнивания в прямом градиентном анализе распределения видов по факторам среды [32, 33, с. 267]. Если в одной или нескольких градациях на встречаемость вида оказывает достоверное влияние какой-либо другой фактор, приводящий к возникновению двух- или многовершинности эмпирического распределения, то проводится процедура выравнивания распределения методом скользящей средней до достоверно одновершинного распределения (эта процедура может осуществляться несколько раз).

Еще один прием с использованием процедуры усреднения («модельный штурм») – это синтез прогнозов (см., например [34-36]). Суть этой процедуры состоит в том, что наравне с факторами воздействия в регрессионные уравнения (классические или самоорганизующиеся) включаются результаты прогнозирования по другим методам, что, фактически, ведет к усреднению всех прогнозов.

Континуализация. Соотношение концепций дискретности и непрерывности в

теоретической экологии – это один из краеугольных камней таких построений [14, 16, 17]. Однако, в данном контексте, континуализация – это процесс, обратный уменьшению размерности системы, это переход от дискретной математической модели системы к непрерывной. В работах [37, 38] получены вероятностные законы распределения числа поворотных точек между соседними максимумами временного ряда (например, реализация годового прироста дерева на протяжении жизни) для случая дискретного и равномерного распределения исходной случайной величины (все $p_i = 1/n$; i меняется от 1 до n) и для непрерывной случайной величины с произвольным всюду дифференцируемом законом распределения. Континуализация дискретной модели ($n \rightarrow \infty$) приводит к полному совпадению с законом распределения расстояний между максимумами непрерывной случайной величины.

Выше уже отмечалось, что известный голландский художник Эшер считается «певцом симметрии» [39]; картины же нашего современника, математика и художника А.Т. Фоменко [40], как нельзя лучше характеризуют многие понятия асимптотики [2, с. 77-78]. Для сравнения – еще две картины.



М. Эшер. Метаморфозы (фрагмент; 1952). Можно было бы назвать «Всемирный потоп», есть что-то от «всякой твари...».



А.Т. Фоменко. Истечение вязкой жидкости или Всемирный Потоп.

[<http://frsv.narod.ru/FOMEN-alb.html>]

Рис. 2. Картины, иллюстрирующие симметрию (М. Эшер) и асимптотику (А. Фоменко).

Асимптотика представляет собой некий метод описания предельного поведения. С этой точки зрения, асимптотика связана с фрактальной геометрией. «Поэтому в самом общем виде понятие фрактала (*именно так назван фрактал в статье.* – Г.Р.) связано с понятием промежуточной асимптотики: размер неровности мал, но много больше некоторого еще меньшего. <...> Для того, чтобы характеризовать область промежуточной асимптотики, когда поверхность тела и лезвие уже негладкие, но мы еще далеки от межатомных размеров, и необходимо понятие фрактала» [41, с. 496].

Цель данной статьи сугубо методологическая – показать невозможность игнорирования всех трех парадигм познания при построении теоретической экологии. При этом асимптотические методы служат для упрощения постановки и решения задач математического моделирования вблизи особенностей (в предельных случаях). В известном смысле, это можно считать проявлением системологического закона о построении потенциально-эффективных моделей [42].

Классика – постнеклассика

Теперь, несколько слов о синергетике. «Применение синергетики для объяснения биологических феноменов вовсе не означает, что мы льем воду на мельницу физикализма и стремимся все биологические процессы свести к феноменам физическим. Смысл существования синергетики состоит как раз в обратном: выяснить природу эмергенции, ведущей к качественным изменениям сложных систем» [43, с. 34-35].

Сложные системы, в отличие от простых [26], имеют большое число взаимосвязанных качеств. Поэтому аналитические модели отдельных их качеств не адекватны им, а имитационные модели достаточно большой совокупности их качеств весьма сложны и недостаточно общи. Пионеры кибернетики, мексиканский физиолог и врач А. Розенблют (Arturo Rosenblueth

Stearns; 1900–1970) и американский математик Н. Винер (Norbert Wiener; 1894–1964) ввели в обиход такой образ: «...the best material model for a cat is another, or preferably the same cat» – «лучшая материальная модель для кошки – это другая, а лучше та же кошка» [44, р. 320] (этот мем любил повторять украинский математик и кибернетик, академик НАНУ А.Г. Ивахненко [1913–2007], от которого я его и услышал).

«В истории развития человечества можно выделить три основных подхода. Эти подходы охватывают все виды человеческой деятельности и лежат в основе смены парадигм. При переходе от одной парадигмы к другой (от *детерминистской* к *стохастической* и далее к третьей *синергетической* парадигме выявлены определенные закономерности. Рассматривая отличия между этими тремя парадигмами, мы вводим философские категории определенности – неопределенности, прогнозируемости – непрогнозируемости. При переходе от детерминистской парадигмы к синергетической степень неопределенности в динамике поведения различных систем возрастает (а именно прогноз резко падает). Для идентификации этих парадигм необходимо выявление параметров порядка для задания внешних управляющих воздействий в управлении и прогнозе процессов» [45, р. 211]. На рис. 3 схематично представлены три парадигмы познания мира (см. также [27]). Согласно В.С. Стёпину (1934–2018) в науке можно выделить три типа научной рациональности: классическую (своего рода, детерминированную), неклассическую (стохастическую) и постнеклассическую (хаос – самоорганизация) [46-48]; каждый из этих типов характеризуется собственной методологией и системой методов, часто, они связаны переходами и взаимовлияниями, и их лучше рассматривать как единую систему познания. Президенту США Джону Ф. Кеннеди приписывают слова о том, что у него есть тысячи специалистов, которые умеют строить пирамиду, и нет ни од-

ного, который бы знал, стоит ли её строить (нет тех, кто способен взглянуть на проблему целиком, системно). Общеметодологическая (междисциплинарная) «системность» подразумевает переход от эвристической стадии синергетических объяснений к более формализованному, конструктивному процессу моделирования. Однако, надо иметь в виду, что «когда математическая дисциплина отходит достаточно далеко от своего эмпирического источника, а тем более, когда она принадлежит ко второму или третьему поколению и лишь косвенно вдохновляется идеями, восходящими

к "реальности", над ней нависает весьма серьезная опасность. Она все более и более превращается в бесцельное упражнение по эстетике, в искусство ради искусства» [49, с. 13] и помнить слова Н.Н. Моисеева [50, с. 99]: «Научное мышление очень консервативно, и утверждение новых взглядов, складывание новых методов научного познания, поиски адекватного представления об Истине и формирование в умах ученых непротиворечивой картины мира происходили медленно и очень непросто».

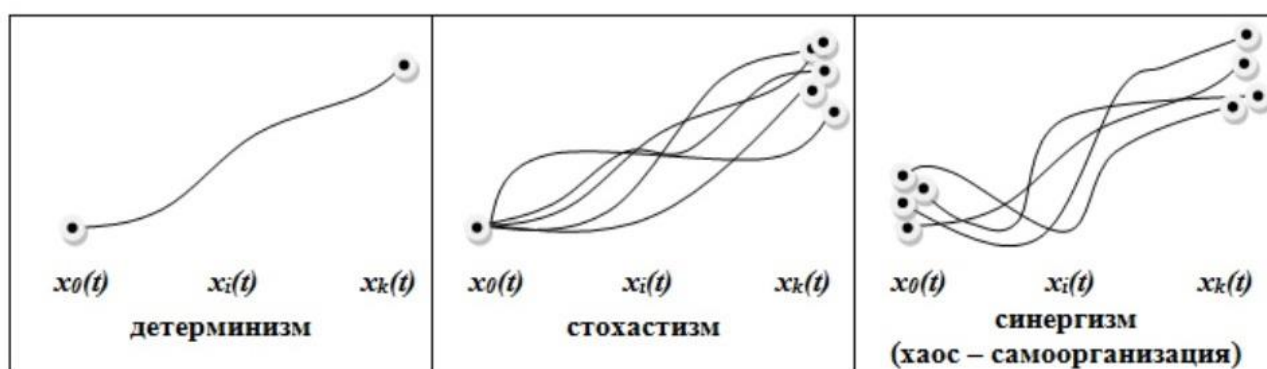


Рис. 3. Соотношение векторов состояния сложных систем для трех парадигм познания мира.

Заключение. Три завершающие цитаты, связанные (на мой взгляд) с названием работы.

- «Беспорядок – это не обязательно признак бессистемности. За столом, на котором все разбросано, можно работать эффективнее, чем за чистым. Когда у человека на столе бардак, это не значит, что он плохо работает. Это значит, что он работает так хорошо, что ему просто некогда убратся. – Clutter is not necessarily a sign of haphazardness. At a table on which everything is scattered, you can work more efficiently than at a clean one. When a person has a mess on the table, this does not mean that he does not work well. This means that he works so well that he simply does not have time to clean up» [51].
- «Синергетика в ее нынешнем виде, конечно, еще далеко не во всех случаях способна стать основой для конкретных и действенных моделей выхода из кри-

зисных ситуаций, в особенности экономических, политических, экологических. Но с позиций синергетики открываются возможности поиска универсальных принципов самоорганизации и коэволюции сложных систем вообще, неких аналогов законов сохранения и эволюции в старой – равновесной – термодинамике. А такого рода знание исключительно важно для моделирования катастрофических ситуаций и эволюционных процессов в экологии, экономике, политике, культуре» [52, с. 3].

- «Нас всегда поражало удивительное умение Николая Владимировича (Тимофеева-Ресовского. – Г.Р.) выделить в любом сложном явлении его существенные черты, упростить ситуацию, не выплеснув с водой и ребенка. Помню, он всегда говорил нам: "Нам деньги платят не за то, чтобы усложнять, а чтобы упрощать". Сейчас этот подход назвали бы системным, хотя Тимофеев-

Ресовский, когда слышал, как кто-нибудь рассуждал о системном подходе, обычно замечал: "Системный подход – это значит: сначала подумай, а потом делай"» [53, с. 71]. Как говорится, одна голова хорошо, а с мозгами лучше...

Литература

1. Панаева А.Я. Воспоминания о домашней жизни Н.А. Некрасова // А.Я. Панаева (Головачева). Воспоминания. – М.: Худ. лит.-ра, 1972. – С. 363–388.
2. Андрианов И.В., Баранцев Р.Г., Маневич Л.И. Асимптотическая математика и синергетика: путь к целостной простоте. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 304 с. (Сер.: Синергетика: от прошлого к будущему).
3. Розенберг Г.С., Саксонов С.В. Порядок – хаос, асимптотика – синергетика: взгляд экологов // Синергетика природных, технических и социально-экономических систем: Сб. статей VII Международной науч. конф. – Тольятти: ТГУС, 2009. С. 15–20.
4. Ruelle D., Takens F. On the nature of turbulence // Commun. Math. Physics. – 1971. – V. 20. – P. 167–192.
5. Шустер Г. Детерминированный хаос. – М.: Мир, 1988. – 250 с.
6. Kruskal M.D. Asymptotology // Proceedings of Conference on Mathematical Models on Physical Sciences. – Englewood Cliffs (NJ): Prentice-Hall, 1963. – P. 17–48.
7. Маневич Л.И. От теории возмущений к асимптотологии // Соросов. образ. журн. – 1996. – № 9. – С. 113–121.
8. Аристотель. Сочинения: в 4-х т. Т. 3. – М.: Мысль, 1981. – 613 с. (Сер.: Философское наследие. Т. 90).
9. Марк Аврелий. Наедине с собой / Пер. с греч., прим. С. Роговина. – М.: Алетейа; Новый Акрополь, 2000. – 224 с.
10. Овшинов А.Н. Социальный порядок и хаос – динамическое равновесие (синергетический подход) // Концепт. – 2017. – № 4. С. 1–9. URL: <http://e-koncept.ru/2017/170092.htm>.
11. Lorenz E.N. Deterministic nonperiodic flow // J. Atmosph. Sci. – 1963. – V. 20. – P. 130–141.
12. Шильников Л.П. Теория бифуркаций и модель Лоренца // Марсден Дж., Мак-Кракен М. Бифуркация рождения цикла и её приложения. – М.: Мир, 1980. – С. 317–335.
13. Малинецкий Г.Г. Сценарии, стратегические риски, информационные технологии // URL: http://www.keldysh.ru/e-biblio/jj/s_r/jst.htm.
14. Работнов Т.А. Фитоценология. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983. – 296 с.
15. Розенберг Г.С. Странный аттрактор в модели растительного сообщества на ранней стадии сукцессии // Математическое моделирование в биогеоценологии: Тез. докл. Всесоюз. шк. – Петрозаводск: АН СССР, 1985. – С. 199–201.
16. Миркин Б.М. Теоретические основы современной фитоценологии. – М.: Наука, 1985. – 136 с.
17. Миркин Б.М., Наумова Л.Г. Наука о растительности (история и современное состояние основных концепций). – Уфа: Гилем, 1998. – 413 с.
18. Gomata J. A new model for interacting populations. I. Two species systems // Bull. Math. Biol. – 1974. – V. 25. – P. 236–242.
19. Монин А.С. О природе турбулентности // Успехи физ. наук. – 1978. – Т. 125, № 1. – С. 97–122.
20. Заславский Г.М., Сагдеев Р.З. Введение в нелинейную физику. От маятника до турбулентности и хаоса. – М.: Наука, 1988. – 368 с.
21. Рабинович М.И. Стохастические колебания и турбулентность // Успехи физ. наук. – 1978. – Т. 125, № 1. – С. 123–167.
22. Гапонов-Грехов А.В., Рабинович М.И. Хаотическая динамика простых систем // Природа. – 1981. – № 2. – С. 54–65.
23. Малинецкий Г.Г. Хаос. Структуры. Вычислительный эксперимент. Введение в нелинейную динамику. – М.: Наука, 1997. – 256 с.
24. Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б. Нелинейная динамика и хаос: основные понятия. – М.: КомКнига, 2006. – 240 с.

25. Флейшман Б.С., Брусиловский П.М., Розенберг Г.С. О методах математического моделирования сложных систем // Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник 1982. – М.: Наука, 1982. – С. 65–79.
26. Розенберг Г.С. Системный подход в глобалистике на примере современных социо-эколого-экономических систем // Век глобализации. – 2022. – № 4 (44). – С. 28–48.
27. Розенберг Г.С., Филатова О.Е. Три парадигмы изучения мира (взгляд экологов) // Принципы экологии. – 2022. – Т. 12. – № 2 (44). – С. 4–14.
28. Розенберг Г.С. Еще раз о редукционизме и холизме в системологии // Сложность. Разум. Постнеклассика. Электронный научный журнал. – 2022. – № 4. – С. 57–72.
29. Grassland Simulation Model / G.S. Innis (Ed.). – N. Y. et al.: Springer, 1978. – 298 p. (Ser.: Ecological Studies, 26).
30. Успенский В.А. Что такое нестандартный анализ? – М.: Наука, 1987. – 128 с.
31. Белова Ю.В. Математическое моделирование биогеохимических циклов в прибрежных системах Юга России: Автореф. дис. ... канд. ф.-м. наук. – Воронеж: ВГУ, 2020. – 16 с.
32. Миркин Б.М., Розенберг Г.С. Фитоценология. Принципы и методы. – М.: Наука, 1978. – 212 с.
33. Розенберг Г.С., Мозговой Д.П., Гелашвили Д.Б. Экология. Элементы теоретических конструкций современной экологии (Учебное пособие). – Самара: Самар. НЦ РАН, 1999. – 396 с.
34. Брусиловский П.М., Розенберг Г.С. Модельный штурм при исследовании экологических систем // Журн. общ. биол. – 1983. – Т. 44, № 2. – С. 266–274.
35. Костина Н.В., Розенберг Г.С., Кудинова Г.Э., Розенберг А.Г., Пыршева М.В. "Мозговой штурм" индексов и индикаторов устойчивого развития (на примере территорий Волжского бассейна) / Юг России: экология, развитие. – 2016. – Т. 11. № 2 (39). – С. 32–41.
36. Костина Н.В., Кудинова Г.Э., Розенберг А.Г., Розенберг Г.С. «Модельный штурм» индексов устойчивого развития социо-эколого-экономических систем региона бассейна крупной реки // Россия: тенденции и перспективы развития. – 2022. – Т. 17. Вып. 1. – С. 1124–1128.
37. Розенберг Г.С. Вероятностный подход к изучению временной структуры растительного покрова // Журн. общ. биол. – 1980. – Т. 41, № 3. – С. 372–385.
38. Розенберг Г.С. Тройка, семерка, туз... (о природе «цикличности» статистических рядов). – Тольятти: Кассандра, 2016. – 52 с.
39. Ernst B. The Magic Mirror of M.C. Escher. – N. Y.: Random House, 1976. – 112 с.
40. Fomenko A.T. Mathematical Impression. – Providence (RI): Amer. Mathematical Soc., 1991. – 184 с.
41. Зельдович Л.Б., Соколов Д.Д. Фракталы, подобие, промежуточная асимптотика // Успехи физ. наук. – 1985. – Т. 146, вып. 3. – С. 493–506.
42. Флейшман Б.С. Основы системологии. – М.: Радио и связь, 1982. – 368 с.
43. Хакен Г., Хакен-Крелль М. Тайны восприятия. – М.: Ин-т компьютер. исслед., 2002. – 272 с.
44. Rosenblueth A., Wiener N. The Role of Models in Science // Philosophy of Science. – 1945. – V. 12. No. 4. – P. 316–321.
45. Еськов В.М., Еськов В.В., Филатов М.А. Философия complexity: гомеостаз и эволюция. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. – 369 с.
46. Стёпин В.С. Научное познание и ценности техногенной цивилизации // Вопр. философии. – 1989. – № 10. – С. 3–18.
47. Стёпин В.С. Классика, неклассика, постнеклассика: критерии различения // Постнеклассика: философия, наука, культура. – СПб.: Миръ, 2009. – С. 249–295.
48. Еськов В.М. Третья парадигма. – Самара: Офорт, 2011. – 250 с.
49. Данилов Ю.А. Джон фон Нейман. – М.: Знание, 1990. – 64 с. (Сер.: Новое в жизни, науке, технике. «Математика, кибернетика»; № 4).
50. Мойсеев Н.Н. Быть или не быть человечеству. – М.: Россия молодая, 1999. – 288 с.

51. Abrahamson E., Freedman D.H. *A Perfect Mess: The Hidden Benefits of Disorder*. – Oxford: Hachette UK, 2013. – 336 p.
52. Князева Е.Н., Курдюмов С.П. *Законы эволюции и самоорганизации сложных систем*. – М.: Наука, 1994. – 229 с. (Сер. Кибернетика – неограниченные возможности и возможные ограничения).
53. Научное наследие Зубра. (О Тимофееве-Ресовском – ученом разговор ведут докт. хим. наук Л.А. Блюменфельд, чл.-корр. АН СССР А.В. Яблоков, докт физ.-мат. наук Ю.М. Свирежев и акад. О.Г. Газенко) // *Наука и жизнь*. – 1988. – № 2. – С. 70–77.
9. Marcus Aurelius. *Alone with Myself / Translation from Greek, notes by S. Rogovin*. – М.: Aleteya; New Acropolis, 2000. – 224 p. (In Russ.).
10. Ovshinov A.N. Social order and chaos – dynamic equilibrium (synergetic approach) // *Concept*. – 2017. – No. 4. P. 1–9. URL: <http://e-kon-cept.ru/2017/170092.htm>. (In Russ.).
11. Lorenz E.N. Deterministic nonperiodic flow // *J. Atmosph. Sci.* – 1963. – V. 20. – P. 130–141.
12. Shilnikov L.P. Bifurcation theory and the Lorentz model // J. Marsden, M. McCracken. *Cycle Birth Bifurcation and its Applications*. – М.: Mir, 1980. – P. 317–335. (In Russ.).
13. Malinetsky G.G. Scenarios, strategic risks, information technologies // URL: http://www.keldysh.ru/e-biblio/jj/s_r/jst.htm. (In Russ.).
14. Rabotnov T.A. *Phytocoenology*. – М.: Publ. House of Moscow. Univ., 1983. – 296 p. (In Russ.).
15. Rozenberg G.S. Strange attractor in the model of a plant community at an early stage of succession // *Mathematical Modeling in Biogeocenology: Abstracts of the reports of the All-Union School*. – Petrozavodsk: Academy of Sciences of the USSR, 1985. – P. 199–201. (In Russ.).
16. Mirkin B.M. *Theoretical Foundations of Modern Phytocoenology*. – М.: Nauka, 1985. – 136 p. (In Russ.).
17. Mirkin B.M., Naumova L.G. *The Science of Vegetation (History and Current State of The Basic Concepts)*. – Ufa: Gilem, 1998. – 413 p. (In Russ.).
18. Gomati J. A new model for interacting populations. I. Two species systems // *Bull. Math. Biol.* – 1974. – V. 25. – P. 236–242.
19. Monin A.S. On the nature of turbulence // *Advances in the Physical Sciences*. – 1978. – V. 125, No. 1. – P. 97–122. (In Russ.).
20. Zaslavsky G.M., Sagdeev R.Z. *Introduction to Nonlinear Physics. From Pendulum to Turbulence and Chaos*. – М.: Nauka, 1988. – 368 p. (In Russ.).
21. Rabinovich M.I. *Stochastic Oscillations and Turbulence // Advances in the Physical*

References

1. Panaeva A.Ya. Memories of home life N.A. Nekrasov // A.Ya. Panaeva (Golovacheva). *Memories*. – М.: Imaginative literature, 1972. – P. 363–388. (In Russ.).
2. Andrianov I.V., Barantsev R.G., Manevich L.I. *Asymptotic Mathematics and Synergetics: A Path to Holistic Simplicity*. – М.: Editorial URSS, 2004. – 304 p. (Ser.: Synergetika: from the past to the future). (In Russ.).
3. Rozenberg G.S., Saxonov S.V. Order – chaos, asymptotics – synergetics: the view of ecologists // *Synergetics of Natural, Technical and Socio-Economic Systems: Collection of Articles of the VII International Scientific Conf.* – Togliatti: TGUS, 2009. S. 15–20. (In Russ.).
4. Ruelle D., Takens F. On the nature of turbulence // *Commun. Math. Physics*. – 1971. – V. 20. – P. 167–192.
5. Shuster G. *Deterministic chaos*. – М.: Mir, 1988. – 250 p. (In Russ.).
6. Kruskal M.D. *Asymptology // Proceedings of Conference on Mathematical Models on Physical Sciences*. – Englewood Cliffs (NJ): Prentice-Hall, 1963. – P. 17–48.
7. Manevich L.I. From perturbation theory to asymptology // *Sorosov. Image. Magazine* – 1996. - No. 9. – P. 113–121. (In Russ.).
8. Aristotle. *Works: in 4 volumes. V. 3*. – М.: Thought, 1981. – 613 p. (Ser.: Philosophical heritage. V. 90). (In Russ.).

- Sciences. – 1978. – V. 125, No. 1. – P. 123–167. (In Russ.).
22. Gaponov-Grekhov A.V., Rabinovich M.I. Chaotic Dynamics of Simple Systems // Nature. – 1981. – No. 2. – P. 54–65. (In Russ.).
23. Malinetsky G.G. Chaos. Structures. Computational Experiment. Introduction to Nonlinear Dynamics. – M.: Nauka, 1997. – 256 p. (In Russ.).
24. Malinetsky G.G., Potapov A.B. Nonlinear Dynamics and Chaos: Basic Concepts. – M.: KomKniga, 2006. – 240 p. (In Russ.).
25. Fleishman B.S., Brusilovsky P.M., Rozenberg G.S. On the methods of mathematical modeling of complex systems // System Research. Methodological Problems. Yearbook 1982. – M.: Nauka, 1982. – P. 65–79. (In Russ.).
26. Rozenberg G.S. System approach in globalistics on the example of modern socio-ecological and economic systems // Century of Globalization. – 2022. – No. 4 (44). – P. 28–48. (In Russ.).
27. Rozenberg G.S., Filatova O.E. Three paradigms of studying the world (view of ecologists) // Principles of Ecology. – 2022. – V. 12. – No. 2 (44). – P. 4–14. (In Russ.).
28. Rozenberg G.S. Once again about reductionism and holism in systemology // Complexity. Intelligence. Postnonclassic. Electronic scientific journal. – 2022. – No. 4. – P. 57–72. (In Russ.).
29. Grassland Simulation Model / G.S. Innis (Ed.). – N. Y. et al.: Springer, 1978. – 298 p. (Ser.: Ecological Studies, 26).
30. Uspensky V.A. What is Non-Standard Analysis? – M.: Nauka, 1987. – 128 p. (In Russ.).
31. Belova Yu.V. Mathematical Modeling of Biogeochemical Cycles in the Coastal Systems of the South of Russia: Dissertation abstract ... cand. of physical and math. sci. – Voronezh: VSU, 2020. – 16 p. (In Russ.).
32. Mirkin B.M., Rozenberg G.S. Phytocoenology. Principles and Methods. – M.: Nauka, 1978. – 212 p. (In Russ.).
33. Rozenberg G.S., Mozgovoy D.P., Gelashvili D.B. Ecology. Elements of Theoretical Constructions of Modern Ecology (Tutorial). – Samara: Samar. SC of the RAS, 1999. – 396 p. (In Russ.).
34. Brusilovsky P.M., Rozenberg G.S. Model assault in the study of ecological systems // Zhurn. Total Biol. – 1983. – V. 44, No. 2. – P. 266–274. (In Russ.).
35. Kostina N.V., Rozenberg G.S., Kudinova G.E., Rozenberg A.G., Pysheva M.V. "Brainstorming" of indices and indicators of sustainable development (on the example of the territories of the Volga basin) / South of Russia: Ecology, Development. – 2016. – V. 11. No. 2 (39). – P. 32–41. (In Russ.).
36. Kostina N.V., Kudinova G.E., Rozenberg A.G., Rozenberg G.S. "Model assault" on indices of sustainable development of socio-ecological and economic systems in the region of the large river basin // Russia: Trends and Development Prospects. – 2022. – V. 17. No. 1. – P. 1124–1128. (In Russ.).
37. Rozenberg G.S. Probabilistic approach to the study of the temporal structure of vegetation // Zh. Total Biol. – 1980. – V. 41, No. 3. – P. 372–385. (In Russ.).
38. Rozenberg G.S. Three, Seven, Ace ... (About The Nature of The "Cyclicity" of Statistical Series). – Togliatti: Kassandra, 2016. – 52 p. (In Russ.).
39. Ernst B. The Magic Mirror of M.C. Escher. – N. Y.: Random House, 1976. – 112 p.
40. Fomenko A.T. Mathematical Impression. – Providence (RI): Amer. Math. Soc., 1991. – 184 p.
41. Zeldovich L.B., Sokolov D.D. Fractals, similarity, intermediate asymptotics // Phys. Sci. – 1985. – V. 146, No. 3. – P. 493–506. (In Russ.).
42. Fleishman B.S. Fundamentals of Systemology. – M.: Radio and Com., 1982. – 368 p. (In Russ.).
43. Haken G., Haken-Krell M. Secrets of perception. – M.: In-t computer. issled., 2002. – 272 p.
44. Rosenblueth A., Wiener N. The Role of Models in Science // Philosophy of Science. – 1945. – V. 12. No. 4. – P. 316–321.
45. Eskov V.M., Eskov V.V., Filatov M.A. Philosophy of complexity: homeostasis and evolution. – Tula: Publ. House of TulSU, 2016. – 369 p. (In Russ.).

46. Stepin V.S. Scientific knowledge and values of technogenic civilization // *Vopr. Philosophy.* - 1989. - No. 10. - P. 3-18. (In Russ.).
47. Stepin V.S. Classics, non-classics, post-non-classics: criteria for distinguishing // *Postnonclassics: Philosophy, Science, Culture.* – St.Pb.: Mir, 2009. – P. 249–295. (In Russ.).
48. Eskov V.M. *Third Paradigm.* – Samara: Etching, 2011. – 250 p. (In Russ.).
49. Danilov Yu.A. *John von Neumann.* – M.: Knowledge, 1990. – 64 p. (Ser.: *New in Life, Science, Technology. "Mathematics, Cybernetics"*; No. 4). (In Russ.).
50. Moiseev N.N. *To Be or Not to Be Humanity.* – M.: Young Russia, 1999. – 288 p. (In Russ.).
51. Abrahamson E., Freedman D.H. *A Perfect Mess: The Hidden Benefits of Disorder.* – Oxford: Hachette UK, 2013. – 336 p.
52. Knyazeva E.N., Kurdyumov S.P. *Laws of Evolution and Self-Organization of Complex Systems.* – M.: Nauka, 1994. – 229 p. (Ser. *Cybernetics – unlimited possibilities and possible limitations*). (In Russ.).
53. *Scientific heritage of the Bison.* (Doctor of Chem. Sci. L.A. Blumenfeld, Cor.-Member of the AS USSR A.V. Yablokov, Doctor of Phys. and Math. Sci. Yu.M. Svirzhev and Acad. O.G. Gazenko) // *Science and Life.* – 1988. – No. 2. – P. 70–77. (In Russ.).