

УДК 519.6+57.011

ПРОСТОТА СЛОЖНОСТИ И СЛОЖНОСТЬ ПРОСТОТЫ¹

© 2019 Г.С. Розенберг

Институт экологии Волжского бассейна РАН –
филиал Самарского федерального исследовательского центра РАН, г. Тольятти (Россия)
Поступила 14.10.2019

Дан комментарий к статье физиков Найджела Гольденфельда и Льва Каданоффа (Goldenfeld, Kadanoff, 1999). Статья дала «в руки» ряд интересных образов и цитат для продолжающихся дискуссий о роли системного подхода в той или иной области знания. Обсуждаются параллели представлений авторов и «конструктивной системологии».

Ключевые слова: сложные системы, конструктивная системология, принципы системологии.

Rozenberg G.S. Simplicity of complexity and complexity of simplicity – An article by physicists Nigel Goldenfeld and Lev Kadanoff (1999) is commented. The article gave "in hand" a series of interesting images and quotes for ongoing discussions about the role of the systems approach in a particular field of knowledge. Parallels of representations of authors and "constructive systemology" are discussed.

Key words: complex systems, constructive systemology, principles of systemology.

Мне уже неоднократно приходилось писать о сложных и простых системах, о сложных и простых параметрах сложных систем, о принципах усложняющегося поведения и т. д. (назову лишь некоторые из последних своих публикаций на эту тему [Розенберг, 2013, 2017; Розенберг и др., 2016; Khasaev et al., 2019]). И, как мне казалось, я «выстроил» вполне функционирующее здание «конструктивного системного подхода» применительно к решению экологических проблем и «освоил» практически всю научную литературу по этому вопросу. Мания величия!..

Переведенная статья (см. выше) физиков Найджела Гольденфельда и Льва Каданоффа (Goldenfeld, Kadanoff, 1999) показала мне, что этими вопросами активно занимались и занимаются не только системологи, но и представители, казалось бы, противоположной стороны методологического противостояния исследователей сложных систем – «физикалисты». Кроме того, статья была написана очень легким (простым) языком и давала мне «в руки» ряд интересных образов и цитат для продолжающихся дискуссий о роли системного подхода в той или иной области знания. Именно поэтому я перевел эту статью и сделал ряд комментариев, с

которыми и знакомлю читателя. Но прежде, несколько слов об авторах статьи.



Голденфельд, Найджел (Nigel D. Goldenfeld; г. р. 1957) – американский физик-теоретик, профессор физического факультета Университета Иллинойса (University of Illinois at Urbana-Champaign, UIUC), директор Астробиологического института общей биологии НАСА (NASA Astrobiology Institute for Universal Biology, at UIUC), руководитель группы

Розенберг Геннадий Самуилович, доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник, genarozenberg@yandex.ru

биологии сложных систем в Институте геномной биологии им. Карла Р. Вёза (Carl R. Woese Institute for Genomic Biology, at UIUC), член Национальной академии наук США (2010), Американской академии наук и искусств (2010).



Каданофф, Лео Филип (Leo Philip Kadanoff; 1937-2015) – американский физик, заслуженный профессор Чикагского университета, в 2007 г. занимал должность президента Американского физического общества; специалист в области статистической физики, физики твёрдого тела; лауреат Премии Вольфа в области физики (1980), Национальной научной медали США (1999), медалей Лоренца (2006) и Исаака Ньютона (2011), член Национальной академии наук США (1979), Американской академии наук и искусств (1982).

А теперь – по существу, критика, комментарий, «мысли вслух».

Академик А.Ф. Алимов (2000, с. 7-8) пишет: «Методологической основой экологических исследований служит системный подход, ориентированный на раскрытие целостности объекта и обеспечивающих её механизмов, на выявление многообразных связей сложного объекта и сведения их в единую теоретическую картину. При этом система, и экологическая система в том числе, понимается как совокупность взаимосвязанных элементов, образующих определенную целостность, единство. Она характеризуется также непрерывным единством с окружающей средой, во взаимодействии с которой система и проявляет свою целостность». В биологии значение системного подхода ин-

туитивно было осознано достаточно давно, еще задолго до того, как сложилась современная теория систем. Более того, биология сыграла одну из главных ролей в превращении системного подхода во всеобщий принцип научного мышления. «Возрастающий интерес к системному подходу и к теории систем в современной биологии продиктован насущными потребностями развития теоретической биологии и методологии теоретического синтеза, стремлением совершенствовать стратегию интегративного познания живой природы в условиях углубляющейся дифференциации знаний о живой природе, о разных уровнях организации живого» (Мирзоян, 1989, с. 90).

Мне представляется, что авторам – Голденфельду и Каданоффу – было бы проще излагать свои взгляды, если бы они воспользовались разделением свойств сложных систем на простые и сложные. Но сначала, краткие ответы на некоторые сравнительно простые вопросы.

Что такое «система»? Традиционным является следующее определение: *система – совокупность элементов со связями между ними*. Следует сразу оговорить относительность этого определения. Так, элемент системы из-за иерархической структуры мира сам оказывается системой со своими элементами. Фиксация системы делит мир на две части – на *систему* и *среду*. При этом подчеркивается большая сила связей элементов внутри системы по сравнению с силой связей с элементами среды. Однако это определение не является полным и в класс однотипных систем могут попасть значительно различающиеся объекты. Классический пример такой ситуации (элементы – углерод и водород, взаимодействие – химическое средство; опираясь только на эти понятия можно создать, как минимум, две системы – предельных и непредельных углеводородов) обсуждал более 40 лет тому назад Ю.А. Урманцев (1974). В этом случае необходимо задать *еще один критерий*, который Урманцев назвал «*законом композиции*». Если указать один из законов (C_nH_{2n+2} или C_nH_{2n}), то систему предельных или непредельных углеводородов можно выделить однозначно.

Таким образом, *система – совокупность элементов со связями между ними, которые подчиняются некоторому закону композиции*. Цель науки, чаще всего, и состоит в поисках этих законов композиции.

Что такое «сложная система»? Каждая система определяется некоторой *структурой* (элементы и взаимосвязи между ними) и *поведением* (изменение системы во времени). Для системологии они являются такими же фунда-

ментальными понятиями, как пространство и время для физикализма (кстати, для последнего они являются изначально неопределяемыми понятиями). В системологии под структурой понимается инвариантная во времени фиксация связей между элементами системы, формализуемая, например, математическим понятием «графа». Под поведением системы понимается её функционирование во времени.

Сложность системы на «структурном уровне» задается числом её элементов и связей между ними. Дать определение «сложности» в этом случае крайне трудно: исследователь сталкивается с так называемым «эффектом кучи» (один шар – не куча, два шара – не куча, три – не куча, а вот сто шаров – куча, девяносто девять – куча; так, где же граница между «кучей» и «не кучей?»). Кроме того, относительность понятия «структура» (деление на формальную и неформальную структуры) заставляет вообще отказаться от него при определении сложности системы.

Определить, что такое «сложная система» на «поведенческом уровне» представляется более реалистичным. Б.С. Флейшман (1978) предложил пять *принципов усложняющегося поведения систем*:

На *первом уровне* находятся системы, сложность поведения которых определяется только *законами сохранения* в рамках вещественно-энергетического баланса; *такие системы изучает классическая физика*. На *втором уровне* располагаются системы с более сложным поведением. Они тоже состоят из вещества и энергии и для них справедливы законы первого уровня, но их особенностью является наличие обратных связей, что и задает более сложное поведение; *функционирование таких систем изучает кибернетика*. Еще более сложным поведением обладают системы *третьего уровня*: они состоят из вещества и энергии, обладают обратными связями, но для их поведения определяющим является способность «принимать решение», т. е. способность осуществлять некоторый выбор (случайный, оптимальный или иной) из ряда вариантов поведения («стимул – реакция»). Системы *четвертого уровня* выделяются по способности осуществлять перспективную активность или проявлять опережающую реакцию («реакция – стимул»). Для особой этот принцип известен как *эффект перспективной активности*, для популяций – *эффект преадаптации*. Наконец, высший (на сегодняшний день), *пятый уровень* сложности объединяет системы, связанные поведением интеллектуальных партнеров, основанных на рассуждениях типа «он думает, что я думаю»

и т. д. (классический пример – шахматная партия и просчет соперниками возможных вариантов её развития). По-видимому, непосредственно к экологии этот тип поведения не имеет отношения, но он становится определяющим при рациональном природопользовании и, особенно, социальных аспектах взаимодействия «Человек – Природа».

Системы, включающие в себя в качестве хотя бы одной подсистемы решающую систему (поведению которой присущ акт решения), будем называть сложными (системы 3-5 уровней; *такие системы изучает системология*). Стремление системы достигнуть предпочтительного для нее состояния будем называть *целенаправленным поведением*, а это состояние – её *целью*. Целями обладают лишь сложные системы.

Что такое «простые» и «сложные» свойства сложных систем (экосистем)? Важное следствие системного подхода к изучению экологических феноменов – различение простых и сложных свойств экосистем. В системологии под *целостными (сложными) параметрами* понимают такие характеристики, которые присущи целой системе, но либо отсутствуют у составляющих её элементов, либо имеются и у элементов, и у системы в целом, но не выводимы для последней из знания их для элементов. Это и есть *принцип эмерджентности*, важную роль которого в экологии особо подчеркивает Ю. Одум (1986, т. 1, с. 17): «принцип несводимости свойств целого к сумме свойств его частей должен служить первой рабочей заповедью экологов». К сожалению, собственно сложные параметры экосистем анализируются не часто – исключение составляет анализ устойчивости и живучести экосистем; основное внимание экологов сконцентрировано на энергетических аспектах функционирования экосистем. Именно об этом и говорят в своей статье Н. Гольденфельд и Л. Кадановф. Иными словами, весь «пафос» статьи состоит в том, что авторы методами физикализма описывают простые свойства сложных систем (!)

Некоторые из принципов системологии, используемые в статье (Goldenfeld, Kadanoff, 1999). Я не буду останавливаться на всех принципах системологии (см., например, [Розенберг, 2013]); укажу лишь на те, которые, как мне показалось, пытаются интерпретировать авторы.

Принцип несовместимости Л. Заде (1974): чем глубже анализируется реальная сложная система, тем менее определены наши суждения о её поведении. Иными словами, сложность системы и точность, с которой её можно анализировать, связаны обратной зависимостью:

«исследователь постоянно находится между Сциллой усложненности и Харибдой недоверности. С одной стороны, построенная им модель должна быть простой в математическом отношении, чтобы её можно было исследовать имеющимися средствами. С другой стороны, в результате всех упрощений она не должна утратить и "рациональное зерно", существо проблемы» [Самарский, 1979, с. 28]). Именно такую ситуацию иллюстрирует цитата: «Сложные системы образуют структуры, и эти структуры сильно различаются по размеру и продолжительности. Их вероятностные распределения редко бывают нормальными, так что исключительные события не так уж редки» (Goldenfeld, Kadanoff, 1999, p. 88).

Принцип контринтуитивного поведения Д. Форрестера (1977): дать удовлетворительный прогноз поведения сложной системы на достаточно большом промежутке времени, опираясь только на собственный опыт и интуицию, практически невозможно. Это связано с тем, что наша интуиция «воспитана» на общении с простыми системами, где связи элементов практически всегда удается проследить. Контринтуитивность поведения сложной системы состоит в том, что она реагирует на воздействие совсем иным образом, чем это нами интуитивно ожидалось. Именно такую ситуацию иллюстрирует цитата: «В любом случае, поведение динамической системы имеет большой скачок, и этот скачок может иметь большие человеческие последствия» (Goldenfeld, Kadanoff, 1999, p. 88).

Принцип множественности моделей В.В. Налимова (1971): для объяснения и предсказания структуры и (или) поведения сложной системы возможно построение нескольких моделей, имеющих одинаковое право на существование. Именно такую ситуацию иллюстрирует цитата, которой завершается переведенная статья: «По-видимому, нет общих законов для сложности. Вместо этого нужно найти «уроки», которые можно с пониманием усвоить в одной системе и применить к другой. Возможно, физика станет больше похожа на человеческий опыт» (Goldenfeld, Kadanoff, 1999, p. 89).

Принцип осуществимости Б.С. Флейшмана (1978, 1982): позволяет отличить модели сложных систем от обычных математических моделей. Математические модели требуют только указания необходимых и достаточных условий существования решения (логическая непротиворечивость: *что есть на самом деле?*). Модели конструктивной математики дополнительно к этому требуют указания алгоритма нахождения этого решения (например,

путем полного перебора всех возможных ситуаций; *как надо это сделать?*). Системология рассматривает только те модели, для которых этот алгоритм осуществим, т. е. решение может быть найдено с заданной вероятностью p_0 за время t_0 (p_0, t_0 -осуществимость; преодоление сложности или ответ на вопрос: *что мы можем сделать?*). Иными словами, принцип осуществимости может быть сформулирован следующим образом: *мы не надеемся на везение и у нас мало времени.*

Принцип формирования законов: постулируются осуществимые модели, а из них в виде теорем выводятся законы сложных систем. При этом законы касаются имеющих место или будущих естественных и искусственных систем. Они могут объяснить структуру и поведение первых и индуцировать построение вторых. Таким образом, *законы системологии носят дедуктивный характер, и никакие реальные явления не могут опровергнуть или подтвердить их справедливость.* Последнее утверждение следует понимать так (Флейшман, 1982, с. 21): несоответствие между экспериментом над реальной сложной системой и законом может свидетельствовать лишь о несоответствии реальной системы тому классу осуществимых моделей, для которых выведен закон; с другой стороны, соответствие эксперимента закону никак не связано с его подтверждением (он в этом не нуждается, будучи дедуктивным) и позволяет «оставаться» исследователю в рамках, принятых при выводе закона допущений и гипотез. Именно такую ситуацию иллюстрирует цитата: «Природа может создавать сложные структуры, даже в простых ситуациях, и некоторые простые законы, даже в сложных ситуациях» (Goldenfeld, Kadanoff, 1999, p. 87).

Наконец, *принцип рекуррентного объяснения:* свойства систем данного уровня иерархической организации мира выводятся в виде теорем (объясняются), исходя из постулируемых свойств элементов этой системы (т. е. систем непосредственно нижестоящего уровня иерархии) и связей между ними. Например, для вывода свойств экосистемы (биоценоза) постулируются свойства и связи популяций, для вывода свойств популяций – свойства и связи особей и т. д. Особенности этого принципа системологии хорошо иллюстрирует цитата из работы ярко «физикалистского плана» В.В. Алексеева (1978, с. 21-22): «Между тем проблема физического истолкования процесса эволюции, хотя к ней привлечено внимание многих крупных ученых, до сих пор остается загадкой. Основное явление, которое требует такого истолкования, – естественный отбор. *Необходимо интерпрети-*

ровать его в точных молекулярных терминах, то есть в конечном счете на языке квантовой механики (выделено мной. – Г.Р.)». Именно такую ситуацию иллюстрирует цитата: «Используйте правильный уровень описания, чтобы "поймать" интересующие вас явления. Для описания бульдозера излишне использовать кварки» (Gol-denfeld, Kadanoff, 1999, p. 88).

Объяснение и прогнозирование в экологии.

Любая естественнонаучная теория выполняет несколько функций, среди которых наиболее важными являются функции **объяснения** и **предсказания** наблюдаемых феноменов в исследуемом классе систем. При этом соотношение объяснения и прогнозирования при системном исследовании сложных экологических объектов практически всегда вызывает дискуссии (см., например, [Еськов, 2004]) и часто недопонимается экологами-практиками. Аналитическим моделям «приписываются» функции прогнозирования, а имитационным – объяснения. В этом контексте очень симптоматично высказывание американского эволюциониста Э. Майра (1970, с. 54): «Теория может предсказывать в той же степени, в какой она может описывать или объяснять». Это утверждение ясно свидетельствует о том, что его автор – физик, ибо ни один биолог не отважился бы на такое заявление... Один из самых существенных вкладов эволюционной теории в философию состоял в том, что она продемонстрировала независимость объяснения от предсказания».

Разделение функций объяснения и прогнозирования для сложных систем в рамках, как минимум, двух моделей сводит на нет всю дискуссию о примате простоты или сложности в экологии. Для объяснения необходимы простые модели, и здесь, по меткому выражению американского кибернетика У.Р. Эшби (1966, с. 177), «в будущем теоретик систем должен стать экспертом по упрощению». Что касается экологического прогнозирования, то сложность модели для сложных объектов принципиально необходима, правда, «переусложнение модели также вредно для результата моделирования, как и её недоусложнение» (Ивахненко, 1980, с. 17).

Завершая это краткое эссе о проблемах сложности экосистем, еще раз подчеркну «знаковость» статьи Н. Гольденфельда и Л. Каданоффа в контексте дискуссии между «физикалистами» и «системологами».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев В.В. Физика и экология. М.: Знание, 1978. 48 с.

Алимов А.Ф. Элементы теории функционирования водных экосистем. СПб: Наука, 2000. 147 с.

Еськов В.М. Место компартментно-кластерного подхода в развитии современных концепций экологии // Экол. вестн. Югории. 2004. Т. 1, № 1-2. С. 7-15.

Заде Л. Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений // Математика сегодня. М.: Знание, 1974. С. 5-49.

Ивахненко А.Г. Моделирование водных экологических систем // Гидробиол. журн. 1980. Т. 16, № 3. С. 12-21.

Майр Э. Причина и следствие в биологии // На пути к теоретической биологии. I. Прологомены. М.: Мир, 1970. С. 47-58.

Мирзоян Э.Н. К истории системного подхода в биологии // Архив анат., гистол. и эмбриол. 1989. Т. 47, № 8. С. 90-97.

Налимов В.В. Теория эксперимента. М.: Наука, 1971. 207 с.

Одум Ю. Экология / В 2-х т. М.: Мир, 1986. Т. 1. 328 с. Т. 2. 376 с.

Розенберг Г.С. Введение в теоретическую экологию / В 2-х т.; Изд. 2-е, исправ. и допол. Тольятти: Кассандра, 2013. Т. 1. 565 с. Т. 2. 445 с.

Розенберг Г.С. Энергия, экология и экономика // Энергия: экономика, техника, экология. 2017. № 2. С. 34-41.

Розенберг Г.С., Рянский Ф.Н., Лазарева Н.В., Саксонов С.В., Симонов Ю.В., Хасаев Г.Р. Общая и прикладная экология: учеб. пособие. Самара; Тольятти: Изд-во Самар. гос. экон. ун-та, 2016. 452 с.

Самарский А.А. Что такое вычислительный эксперимент? // Наука и жизнь. 1979. № 3. С. 27-33.

Урманцев Ю.А. Симметрия природы и природа симметрии. М.: Мысль, 1974. 229 с.

Флейшман Б.С. Системные методы в экологии // Статистические методы анализа почв, растительности и их связи. Уфа: ИБ БФАН СССР, 1978. С. 7-28.

Флейшман Б.С. Основы системологии. М.: Радио и связь, 1982. 368 с.

Форрестер Д. Антиинтуитивное поведение сложных систем // Современные проблемы кибернетики. Вып. 7. М.: Знание, 1977. С. 9-25.

Эшби У.Р. Несколько замечаний // Общая теория систем. М.: Мир, 1966. С. 171-178.

Goldenfeld N.D., Kadanoff L.P. Simple lessons from complexity // Science. 1999. V. 284, No. 5411. P. 87-89.

Khasaev G.R., Lazareva N.V., Kudinova G.E., Kuznetsova R.S., Rozenberg G.S. Ecology, innovation, and quality of life: *ab ovo usque ad mala* // Economic Growth and Sustainable Development of Economic Systems. Contradictions in the Era of Digitalization and Globalization. Cham (Switzerland): Springer, 2019. P. 121-134.