

УДК 501

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОНЯТИЯ «СЛОЖНАЯ СИСТЕМА» В КОНТЕКСТЕ НАУКИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

Глаз Роман Алексеевич, аспирант Государственного университета «Дубна», г. Дубна, Россия

Шамаева Екатерина Федоровна, кандидат технических наук, доцент, ведущий специалист Центра проектирования устойчивого развития институтов гражданского общества Государственного университета управления, г. Москва, Россия

Пряхин Вадим Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры геоинформационных систем и технологий Государственного университета «Дубна», г. Дубна, Россия

### Аннотация

*В статье проанализированы основные положения в отношении сложных систем. Рассмотрены системы, которые изучаются в рамках науки устойчивого развития. Подробно описана связь понятия сложной системы с понятием системы, а также проанализированы требования к системе в контексте исследования. На основе материала из различных источников предложены требования к понятию сложной системы в контексте исследований в области устойчивого развития. Сформированы требования к сложной системе. Подробно описаны критерии сложности и дано определение такой системе в контексте исследования.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** сложные системы, системный анализ, устойчивое развитие, системный анализ, теория систем, большая система.

## DEFINITION OF THE CONCEPT OF A “COMPLEX SYSTEM” IN THE CONTEXT OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT SCIENCE

Glaz Roman Alekseevich, postgraduate student of the Dubna State University, Dubna, Russia

Shamaeva Ekaterina Fedorovna, candidate of technical sciences, associate professor, leading specialist of Center for Designing Sustainable Development of Civil Society Institutions, State University of Management, Moscow, Russia

Pryakhin Vadim Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Geoinformation Systems and Technologies, Dubna State University, Dubna, Russia

### Abstract

*The article analyzes the main provisions in relation to complex systems. The systems that are studied in the framework of the science of sustainable development are considered. The relationship of the concept of a complex system with the concept of a system is described in detail, as well as the requirements for the system in the context of the study are analyzed. Based on material from various sources, the requirements for the concept of a complex system in the context of research in the field of sustainable development are proposed. The requirements for a complex system have been formed. The complexity criteria are described in detail and such a system is defined in the context of the study.*

**KEYWORDS:** complex systems, system analysis, sustainable development, system analysis, systems theory, big system.

### Введение

С момента принятия концепции устойчивого развития, Российская Федерация инвестирует ресурсы в планомерный, рациональный, экологический и социально-ориентированный расход общественных сил и природных ресурсов в целях устойчивого развития Российского общества. Наука устойчивого развития работает с системами, которые отличаются сложностью описания, большими размерами и сложностью управления. Такие

системы являются сложными, однако на сегодняшний день не существует единых и понятных критериев определения сложности системы в науке устойчивого развития. Сложные системы – это системы, которые необходимо описывать в соответствии с законами описания сложных систем. Управление такими системами имеет определенную специфику, которая на сегодняшний день не обозначена научным сообществом. Из этого следует цель работы.

**Цель:** дать определение понятию «сложная система» в контексте науки устойчивого развития.

**Задачи:**

- проанализировать существующую литературу, посвященную понятию сложных систем;
- изучить и описать существующие системы, которые исследуются в науке устойчивого развития;
- проанализировать базовые требования системности в контексте понятия «сложная система»;
- сформировать общие требования сложности системы в контексте исследования;
- описать особенности развития сложных систем.

**Методы исследования**

В ходе проведенного исследования использовались различные общенаучные методы научного исследования. Все они представлены в таблице ниже вместе с их применением (табл. 1).

**Таблица 1. Методы проведенного исследования**

| Метод                 | Применение в контексте исследования                                                                                                                                                                               |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Дедукция              | Изучение сходства признаков рассматриваемой сложной системы между собой для дальнейшего формирования общего заключения о сходстве отдельных ее элементов, подсистем, компонентов и т.д.                           |
| Индукция              | Изучение частных особенностей рассматриваемых систем (подсистем, компонентов) для дальнейшего их сопоставления и формирования на его основе отличительных признаков большой сложной системы.                      |
| Системный анализ      | Изучение объекта исследования как совокупности элементов, компонентов и подсистем, образующих большую сложную систему.                                                                                            |
| Анализ                | Изучение объекта (в данном исследовании - систем) с помощью его декомпозиции на отдельные компоненты и выявления и описании свойств, присущих этим компонентам.                                                   |
| Синтез                | Соединение отделенных путем анализа компонентов в единое целое для установления связи между ними и познания системы как единой совокупности элементов.                                                            |
| Аналогия              | Получение знаний о системе на основе ее сходства с другими системами; определение сходств изучаемых объектов на основе сходства отдельных их составляющих (компонентов, структуры, подсистем, элементов, связей). |
| Аксиоматический метод | Постулирование на основе логических правил некоторых утверждений, на основе которых проводится исследование.                                                                                                      |
| Абстрагирование       | Отделение ряда свойств, признаков и особенностей изучаемой системы от их общей совокупности как наиболее важных в контексте исследования.                                                                         |

### **Предмет исследования**

Предметом исследования выступают все системы, которые изучаются в рамках науки устойчивого развития. К таким системам могут быть отнесены все социо-экономико-экологические системы, их подсистемы, их структура, возникновение и связи в них. Для описания, выделения общих свойств и закономерностей таких систем, в статье исследуются основные положения теории систем и системного анализа.

### **Материалы исследования**

К материалам исследования относятся все публикации, работы и исследования, посвященные, во-первых, описанию сложных систем (в экономике, физике, экологии, образовании и т.д.), во-вторых, описанию систем в устойчивом развитии региона или отрасли.

К первой группе источников, прежде всего, могут быть отнесены работы американского специалиста в области сложных систем Янира Бар-Яма. Ряд его работ [1-3] посвящены отличительным особенностям сложных систем, причин их возникновения и особенностям их изучения в сравнении с системами обычными (которые не являются сложными). Главная ценность этих работ в контексте исследования заключается в их «универсальности» - Я.Бар-Ям описывает сложные системы без привязки их к какой-либо отрасли, описывает понятие сложной и большой системы именно на основе совокупности таких систем и в результате определения их признаков приводит примеры из самых разных областей. Одним из важнейших его постулатов в контексте проводимого исследования является размер системы как одна из ключевых характеристик сложной системы – любая сложная система является и большой.

Также особую роль играет пособие по моделированию сложных систем, написанное В. Вемури в 1978 году [4]. Помимо рекомендаций к моделированию он дает определение и характерные особенности сложных систем – сложность их наблюдения, масштабность, динамичность и наличие поведенческих противоречий между отдельными подсистемами в отношении достижения цели системы.

С другой стороны, важную роль играют работы российских ученых, которые занимаются вопросами сложных систем в различных отраслях [5-12]. Отдельные положения их исследований, а именно понимание вопроса определения сложных систем будет рассмотрено далее в работе.

### **Системы в науке устойчивого развития**

Наука устойчивого развития занимается изучением свойств, закономерностей, функций, поведения, а также прогнозирования и управления таких систем, как социальная, экономическая

и экологическая, их взаимосвязи и подсистем. Все эти три системы можно обозначить как единую систему – система Природа-Общество-Человек. Схематически можно изобразить структуру рассматриваемых в науке систем так, как это показано на рисунке (рис. 1).

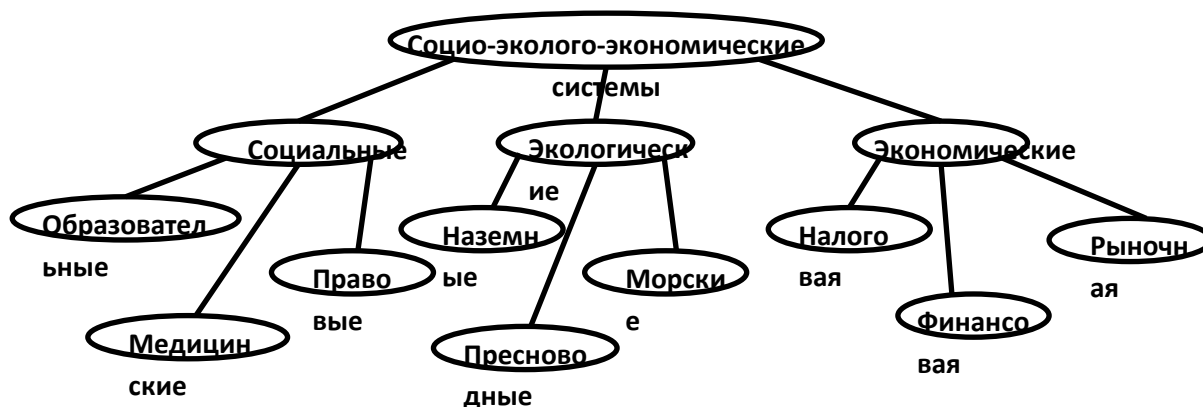


Рис. 1. Иерархическая структура систем в науке устойчивого развития

Важно отметить, что иллюстрация имеет схематический характер – основная ее цель показать, что система в науке устойчивого развития имеет множество градаций и уровней, на которых может быть рассмотрена.

Все проиллюстрированные системы, а также множество систем, которые не вошли в иллюстрацию, имеют ряд отличительных признаков, которые позволяют их выделить среди других систем (таких, как автомобиль, станок и т.д.).

Следует выделить ряд важных свойств всех систем в науке устойчивого развития:

1. Все системы в науке устойчивого развития являются открытыми (т.е. подвержены влиянию извне).
2. Всем этим системам свойственно эволюционное развитие или постоянно сохраняющаяся тенденция к изменению.
3. Каждая такая система характеризуется множеством подсистем, неоднородностью связей между ними и компонентами, элементами и т.д.
4. Любая система может быть рассмотрена с разных сторон и на разном уровне в связи с тем, что элементом системы может быть определена любая ее составляющая.
5. Каждая система, которая рассматривается в науке устойчивого развития, имеет множество входных и выходных сигналов и является нелинейной.
6. Состояние системы является трудным для оценки. Под трудностью имеется ввиду наличие множества критериев и их весовая разность.
7. Каждая такая система включает в себя разнородные по природе элементы.

Все отличительные особенности, которые свойственны системам в устойчивом развитии, можно представить в виде таблицы (табл. 2):

Таблица 2. Свойства систем устойчивого развития

|                                      |                                                                                               |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Размер                               | Большой                                                                                       |
| Развитие                             | Эволюционное                                                                                  |
| Наличие подсистем                    | Есть                                                                                          |
| Наличие уровней                      | Есть                                                                                          |
| Формализованный аппарат              | Статистический (недетерминированный)                                                          |
| Степень организованности             | Самоорганизующиеся                                                                            |
| Линейность                           | Нелинейная                                                                                    |
| Наличие цели                         | Не всегда определена                                                                          |
| Наличие централизованного управления | Нет                                                                                           |
| Связи                                | Многообразные, разнородные                                                                    |
| Структура                            | Смешанная (с наличием горизонтальных и вертикальных связей), с произвольными связями, сетевая |
| Элементы                             | Разнородные, многообразные                                                                    |
| Оценка состояния                     | Многокритериальная                                                                            |

### Формирование общих свойств сложных систем

Опираясь на тезисы, сформулированные в работах [1-4], можно сформировать ряд критериев для определения системы как сложной. Так, сложные системы имеют следующие отличительные особенности:

1. Любая сложная система является и большой;
2. Любая сложная система имеет эволюционное развитие;
3. Любая сложная система характеризуется наличием большого количества уровней, на которых может быть рассмотрена (например, экосистема, лес, дерево);
4. Любой сложной системе присущи паттерны формирования.

Однако даже на уровне описания свойств сложных систем есть множество противоречий. Так, в учебном пособии по системному анализу [8] утверждается, что сложная система – это система, которая удовлетворяет хотя бы одному из перечисленных свойств:

- систему можно разбить на подсистемы и изучать каждую из них отдельно;
- система функционирует в условиях существенной неопределённости и воздействия среды на неё, обуславливает случайный характер изменения её показателей;
- система осуществляет целенаправленный выбор своего поведения.

Кроме того, автор подчеркивает, что любая большая система является сложной, но не говорит о том, что любая сложная система является большой. Это наиболее существенное противоречие с исследованиями Я. Бар-Яма и В. Вемури.

И.Н. Глухих предлагает [9] другой подход к описанию сложных систем. Как и В.Н. Чернышев, автор указывает на существование прямой взаимосвязи между сложностью и

размером системы – любая сложная система является и большой. Для сложной системы предлагаются следующие характеристики:

- сложность назначения и многообразие выполняемых функций;
- большие размеры системы по числу элементов, их взаимосвязей, входов и выходов;
- сложная иерархическая структура системы, позволяющая выделить в ней несколько уровней с достаточно самостоятельными элементами на каждом из уровней, с собственными целями элементов и особенностями функционирования;
- наличие общей цели системы и, как следствие, централизованного управления, подчиненности между элементами разных уровней при их относительной автономности;
- наличие в системе активно действующих элементов — людей и их коллективов с собственными целями (которые, вообще говоря, могут не совпадать с целями самой системы) и поведением;
- многообразие видов взаимосвязей между элементами системы (материальные, информационные, энергетические связи) и системы с внешней средой.

С другой стороны, авторы в источнике [10], называют главной характеристикой сложной системы наличие у нее подсистем.

Выделим ряд отличительных свойств сложной системы на основе описанных выше источников (табл. 3).

**Таблица 3. Свойства сложных систем**

|                                      |                                      |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Размер                               | Большая                              |
| Развитие                             | Эволюционное                         |
| Наличие подсистем                    | Есть                                 |
| Наличие уровней                      | Есть                                 |
| Формализованный аппарат              | Статистический (недетерминированный) |
| Степень организованности             | Самоорганизующиеся                   |
| Структура                            | Разветвленная, иерархическая         |
| Наличие цели                         | Есть                                 |
| Наличие централизованного управления | Есть                                 |
| Связи                                | Многообразные, разнородные           |

Важно отметить, что ряд перечисленных свойств сложных систем не соответствует сложным системам в науке устойчивого развития. Так, в устойчивом развитии структура системы может быть не разветвленной и не иерархической, а, например, сетевой (биосистема, экосистема).

Другим важным отличием от системы в науке устойчивого развития является наличие централизованного управления – в устойчивом развитии практически нет систем, поведение которых может быть однозначно определено. Сложное управление – один из отличительных признаков в науке устойчивого развития.

### Понятие системы и его связь с понятием сложной системы

Прежде всего любая сложная система – это система. Так, говоря о понятии сложной системы, следует подчеркнуть, что любая сложная система должна соответствовать общим требованиям к системе. Рассмотрим ниже ключевые:

1. Любая система состоит из элементов – неделимых частей системы, неделимость которых определена нецелесообразностью их деления в условиях моделирования системы. Таким образом, любая система может быть представлена в виде формулы:

$$A = \{a_i\}; i = 1, 2 \dots, n \quad (1)$$

Причем важно, что каждый элемент характеризуется свойствами, которые однозначно определяют его в системе.

2. В любой системе присутствуют связи между ее элементами – зависимости свойств одного элемента со свойствами другого. Множество таких связей может быть представлено в виде формулы:

$$Q = \{q_{ij}\}; i, j = 1, 2 \dots, n \quad (2)$$

3. В любой системе элементы взаимодействуют между собой, обращаясь к свойствам друг друга.
4. Любая система имеет структуру, характеризующую ее строение. Структура может быть представлена в виде множества элементов и их свойств:

$$D = \{A; Q\} \quad (3)$$

Соответственно, говоря о понятии сложной системы, прежде всего следует учитывать, что любая сложная система должна удовлетворять вышеописанным требованиям.

Далее будут сформированы особенности сложной системы в отношении четырех базовых характеристик системы.

1. В сложной системе, благодаря ее многоуровневости, базовым элементом может служить большое множество различных объектов в пределах этой системы. Причем все такие элементы будут разнородны в отношении их свойств, характеристик, функций и целей, которые зачастую меняются во времени. Такая система всегда будет являться гетерогенной.
2. Сложная система характеризуется большим количеством связей, их неоднородностью и неочевидностью.
3. Взаимодействие элементов меняется во времени, оно может ослабевать или усиливаться, появляться и исчезать в определенный момент времени.

4. Любая сложная система имеет сложную структуру с большим количеством связей, структура может быть смешанной, сетевой или с произвольными связями.

### **Развитие сложных систем в устойчивом развитии**

Известно, что все системы характеризуются их развитием. В том случае, если система развивается, ее развитие может быть охарактеризовано как интенсивное (развитие структуры, компонентов, подсистем с увеличением объема выходных потоков, непропорционального увеличению входных) и экстенсивное (развитие, в результате которого увеличение выходных потоков связано с увеличением входных). Первый вид развития приводит к появлению больших и сложных систем. Второй вид развития приводит к появлению больших систем, т.к. в нем не меняется структура, свойства и связи.

Другим важным критерием развития сложных систем является доминирующее преобразование системы в ходе развития. Оно может быть:

1. Субстратным – ключевые изменения происходят в развитии элементов и в составе системы;
2. Структурным – изменения происходят в структуре;
3. Организационным – изменения происходят в организации;
4. Функциональным – изменения происходят в назначении системы.

Сложные системы в устойчивом развитии ввиду их многоуровневости и разнообразии элементов имеют доминирующим преобразованием субстратное (при этом остальные не исключаются). Так, например, в биосистеме все функциональные, структурные и организационные изменения связаны в первую очередь с развитием ее базовых элементов: появление и развитие автотрофных организмов привело к появлению и развитию гетеротрофных организмов.

Различные механизмы развития системы (детерминированное, бифуркационное, вероятностно-стохастическое) также могут служить описанием сложной системы в устойчивом развитии. Так, развитие таких систем недетерминированное, но всегда либо вероятностное, либо бифуркационное.

В работе [11] автор указывает на необходимость введения обобщенных показателей для оценки поведения и состояния системы в науке устойчивого развития на основе универсальных индикаторов.

### **Определения понятия сложная система**

Предлагаемое определение [1] сложных систем звучит так:



*Сложная система - это система, поведение которой сложно моделировать из-за зависимостей, конкуренции, взаимоотношений или других типов взаимодействий между их частями или между данной системой и ее окружением.*

Однако такой подход к определению понятия сложной системы не позволяет точно отделить сложную систему от простой, потому что понятие «сложное моделирование» нуждается в большей конкретизации и уточнениях. Другое определение, отличное от предложенного выше, звучит так:

*Сложная система — система, состоящая из множества взаимодействующих составляющих (подсистем), вследствие чего она приобретает новые свойства, которые отсутствуют на подсистемном уровне и не могут быть сведены к свойствам подсистемного уровня.*

Такое определение тоже в контексте исследования имеет ряд ограничений, хотя и указывает на многоуровневость системы как на ее отличительное свойство.

С другой стороны, в учебнике по теории система и системному анализу, который предлагает Прохорова И.А. [12], определение сложной системы выглядит так:

*Сложные системы – это системы, которые нельзя скомпоновать из некоторых подсистем.* Это равноценно тому, что:

- а) наблюдатель последовательно меняет свою позицию по отношению к объекту и наблюдает его с разных сторон;
- б) разные наблюдатели исследуют объект с разных сторон.

В контексте исследования такое определение также является неполным, несмотря на то, что оно указывает на сложность оценки, сложность наблюдения, многоуровневость.

Исходя из всего вышеперечисленного, в контексте исследования можно сформировать следующее определение сложной системы в науке устойчивого развития:

*Сложная система – это открытая многоуровневая система, появившаяся в результате интенсивного развития, состояние которой может быть описано множеством критериев.*

## Выводы

На основании проведенного исследования, можно сформировать ряд критериев сложной системы науке устойчивого развития (табл. 4).

Таблица 4

|              |              |
|--------------|--------------|
| Размер       | Большая      |
| Развитие     | Эволюционное |
| Тип развития | Интенсивное  |

|                                      |                                                                                               |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Наличие уровней                      | Есть                                                                                          |
| Формализованный аппарат              | Статистический (недетерминированный)                                                          |
| Степень организованности             | Самоорганизующиеся                                                                            |
| Линейность                           | Нелинейная                                                                                    |
| Наличие цели                         | Не всегда определена                                                                          |
| Наличие централизованного управления | Нет                                                                                           |
| Связи                                | Многообразные, разнородные                                                                    |
| Структура                            | Смешанная (с наличием горизонтальных и вертикальных связей), с произвольными связями, сетевая |
| Элементы                             | Разнородные, многообразные                                                                    |
| Оценка состояния                     | Многокритериальная                                                                            |
| Базовый элемент                      | Вариативен в определении                                                                      |
| Количество связей                    | Множественное                                                                                 |
| Механизм развития                    | Бифуркационный, вероятностно-стохастический                                                   |

Определение сложной системы корректно сформулировать следующим образом:

*Сложная система – это открытая многоуровневая система, появившаяся в результате интенсивного развития, состояние которой может быть описано множеством равновесных критериев, элементы которой отличаются разнородностью.*

### Заключение

В статье проанализированы основные определения сложных систем в учебных пособиях, анализах и статьях. Проанализированы особенности систем в области устойчивого развития. Эти особенности были соотнесены, в результате чего было предложено определение и критерии понятия «сложная система» в устойчивом развитии.

### Литература

1. Bar-Yam, Y. (2000). Unifying Themes in Complex Systems, Volume 1: Proceedings of the First International Conference on Complex Systems. New York: Perseus Books. ISBN 978-0-7382-0049-1.
2. Bar-Yam, Y.; Minai, A. A. (2003). Unifying Themes in Complex Systems, Volume 2: Proceedings of the Second International Conference on Complex Systems. New York: Perseus Books. ISBN 978-0-8133-4124-8.
3. Bar-Yam, Yaneer (2002). "General Features of Complex Systems" (PDF). Encyclopedia of Life Support Systems. Archived (PDF) from the original on 2022-10-09. Retrieved 16 September 2014.
4. Vemuri, V. (1978). Modeling of Complex Systems: An Introduction. New York: Academic Press. ISBN 978-0127165509.
5. Мартянов Е.И., Карпушкин С.В., Алексеев В.В. Проблемно-ориентированная система управления и оптимизации основных параметров технически сложных систем // Автоматика. Информатика. Управление. Приборы. - 2021. - Т.27, №3. - С. 336-344.

6. Сергеев, С.Ф. Интеллектуальный техносимбиоз в сложных человеко-машинных системах / С.Ф. Сергеев // Эргодизайн. – 2021 - №1 (11). – С. 70-76. - DOI: 10.30987/2658-4026-2021-1-70-76.
7. Булгаков С.В., Цветков В.Я. Сложные системы: монография. – Москва: МАКС Пресс, 2019. – 184 с
8. Чернышов В.Н., Чернышов А.В. Теория систем и системный анализ : учеб. пособие / В.Н. Чернышов, А.В. Чернышов. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 96 с. – 150 экз. – ISBN 978-5-8265-0766-7.
9. Глухих И.Н. Теория систем и системный анализ [Электронный ресурс]: учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2016. 148 с.
10. Теория систем и системный анализ: Учебник для бакалавров / В. М. Вдовин, Л. Е. Суркова, В. А. Валентинов. — 3-е изд. — М.: Издательско@торговая корпорация «Дашков и К°», 2016. — 644 с.
11. Шамаева Е.Ф. Методика оценки экологической и энергетической эффективности взаимодействия общественных и природных систем. Цифровая трансформация в энергетике. 2020;1:237–241.
12. Пряхин В. Н., Храпов В. Б. Оптимизация показателей надежности сложных систем при нескольких ограничениях // Вестник Международной общественной Академии экологической безопасности и природопользования. 2008. Вып. 4(11). С.130–135.