

*Выдвигается и исследуется концепция максимально-допустимых нагрузок на природу, которая в конце 1980-х и начале 1990-х гг. привела к выработке понятия «устойчивое развитие». Авторами статьи достаточно обобщенно раскрывается содержание современных научных подходов к исследованию проблемы устойчивого развития. В результате следует, что оценка устойчивости развития проводится на основе множества индексов и индикаторов, отображающих различные аспекты социально-экономического, социально-правового и экологического положения в странах мира. Это приводит к неоднозначности получаемых результатов от прилагаемых усилий, что объясняется чрезвычайной сложностью системы «экономика – экология – общество – право». Таким образом, сбалансирование основных составляющих устойчивого развития представляет в современности сложную научную проблему.*

*Ключевые слова:* пороговый уровень; теория управления; устойчивое развитие; природо-промышленные системы; экосправедливость.

**Николай Сергеевич Попов**, д-р техн. наук, профессор,  
кафедра «Природопользование и защита окружающей среды»,  
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»;  
[eco@nnn.tstu.ru](mailto:eco@nnn.tstu.ru)

**Ольга Викторовна Пещерова**, ассистент,  
кафедра «Природопользование и защита окружающей среды»,  
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»;  
[eco@nnn.tstu.ru](mailto:eco@nnn.tstu.ru)

**Алина Эдуардовна Стрельникова**, экономист,  
ООО «Известняк»;  
[eco@nnn.tstu.ru](mailto:eco@nnn.tstu.ru)

## **ХАРАКТЕРИСТИКА И ПАРАМЕТРЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИКИ, ПРИРОДЫ И ОБЩЕСТВА КАК СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ: СОЦИАЛЬНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ВЗГЛЯД НА ПРОБЛЕМУ**

С позиций теории управления большими системами стремительный рост численности населения на Земле представляет собой мощный внутрибиосферный динамический процесс, активно воздействующий не только на состояние внешних к нему экосистем, но и на внутренние параметры социальных структур. Следствием данного неконтролируемого процесса стало появление новых угроз безопасности современного мира не только в контексте военно-политических проблем, но и эколого-экономических. Поскольку расчетная траектория развития цивилизации в научном плане не определена, то реальная чаще всего приводит человечество к разного рода биосферным катастрофам (войнам, опустыниванию земель, климатическим сдвигам) и значительно реже к достижению метастабильных состояний, характеризуемым всеобщим процветанием, сохранностью биоразнообразия, равноправными экономическими отношениями между странами, отсутствием качественных изменений природной среды и т.д.

Именно «равновесные состояния» на траектории движения цивилизационной системы представляют особый интерес, поскольку отражают устойчивые (в некотором смысле) положения в биосфере, не угрожающие жизни человечества, но они долго не сохраняются из-за влияния постоянно действующих внешних факторов.

На сегодня критерием выбора «наилучшей» траектории роста цивилизации во времени служит уровень благосостояния людей, ради повышения которого часто приходится игнорировать экологические последствия, а в лучшем случае – соизмерять нагрузки на биосферу в соответствии с ее поддерживающей (пропускной) способностью. Иначе говоря, приходится идти на уступки, компромиссы и самоограничения в использовании невозобновляемых природных ресурсов, токсичных материалов, «грязных» технологий и т.п.

Концепция максимально-допустимых нагрузок давно используется биологами, однако редко принимается в расчет экономистами. Она рассматривает взаимодействия численности населения, его хозяйственной деятельности и природной среды, придавая особое значение «пороговым» уровням. Рост численности потребителей продукции биосистем, превышающий предельный уровень, ведет к их разрушению или деградации: необратимому сокращению численности популяций, потерям плодородия почв, нарушению естественной циркуляции веществ в биосфере, климатическим переменам, утратам биоразнообразия.

В подобных ситуациях характер поведения процессов взаимодействия экологических систем с социально-экономическими приводит к различным вариантам нестабильности: затухающим и незатухающим во времени колебаниям, скачкообразному переходу систем из одного состояния в другое, «экологическим катастрофам» (бурному цветению водорослей, размножению грызунов и других биологических видов).

Внимание к проблеме устойчивости эколого-экономических процессов проявлено со стороны ООН в начале 1970-х гг. Позже, в конце 1980-х и начале 1990-х гг., появилось принципиально важное понятие «устойчивое развитие», согласно которому страны мира с различным по уровню экономическим потенциалом должны выходить на собственные траектории роста благосостояния граждан, сохраняя при этом свои природные богатства. Появилась новая этическая норма, именуемая экосправедливостью.

Проблемой устойчивого развития с начала 1990-х гг. занимаются различные научные школы с акцентом на те ее стороны, которые их интересуют в наибольшей степени [5]. Как следует из табл. 1, нет единого мнения о том, каким образом оценивать устойчивость эколого-экономических взаимодействий, поскольку понятие «устойчивое развитие» первоначально не было сформулировано математически корректно, а записано в документах ООН как «такое развитие, при котором удовлетворяются потребности настоящего времени, но не ставится под угрозу способность будущих поколений удовлетворять свои потребности».

По этой причине в настоящее время оценка устойчивости развития проводится на основе множества индексов и индикаторов, отображающих различные аспекты социально-экономического и экологического положения

Таблица 1

**Основные научные подходы к исследованию  
проблемы устойчивого развития**

Название теории	На чем базируется теория
1	2
Неоклассическая	Недопущении снижения благосостояния (антропоцентризме); устойчивости развития посредством новых технологий и замещений; оптимизации экстернальных издержек окружающей среды; сохранности совокупных запасов природного и экономического капитала; преобладании индивидуальных целей над социальными; необходимости проявлять благоразумие при конфликтах индивидуальных целей; ориентации на долговременную политику, основанную на рыночных решениях
Неоавстрийская (временная)	Телеологическом учении о последовательной во времени, сознательной и целенаправленной адаптации; предупреждении необратимых последствий; сохранности организационной структуры экономики (негаэнтропии); динамической оптимизации процесса добычи, производства, потребления, рециркуляции и переработки отходов
Эколого-эволюционная	Сохранности свойства самовосстановления природных систем, допускающих флуктуации и циклы (регулярные деструкции); получении знаний о неопределенности в природных процессах; отсутствии в пищевых цепях господства человека; поощрении генетического / биологического / экосистемного разнообразия; сбалансированности потоков питательных веществ в экосистемах
Эволюционно-экологическая	Поддержании коэволюционной адаптивной способности за счет знаний и технологий при контактах с неопределенностями; поощрении экономического разнообразия агентов, секторов и технологий
Физико-экономическая	Ограничении материально-энергетических потоков, вовлекаемых в экономику и выходящих из нее; промышленном метаболизме, в структуре которого заложена материально-продуктовая цепочка: интегральная переработка отходов, сокращение негативного воздействия отходов, рециркуляция и увеличение продукта
Био-физико-энергетическая	Равновесии при минимальной пропускной способности вещества и энергии; сохранности физических и биологических ресурсов и биоразнообразия; использовании энергосистем с минимальным эффектом загрязнения
Системно-экологическая	Контроле прямых и косвенных воздействий человека на экосистемы; балансе материальных входных и выходных потоков в общественных (людских) системах; минимизации стрессовых факторов локального и глобального масштаба, воздействующих на экосистемы

1	2
Эколого-инженерная	Интеграции общественной пользы и качества окружающей среды посредством управления экосистемами; проектировании и улучшении инженерных решений в пограничной области экономики, технологии и экосистем; использовании свойств упругости, самоорганизации, саморегуляции и полезных для человека функций природных систем
Экология человека с позиций теории устойчивости	Сохранении пределов пропускной способности (логистического роста); ограничении размеров экономики и народонаселения; потреблении ресурсов исключительно на базовые нужды; скромном позиционировании в пищевой цепи экосистемы и биосферы; учете множественности пространственно-временных воздействий общества на природу
Социо-биологическая	Оказании поддержки социокультурных взаимодействий с экосистемами; внимании вопросам природы, интегрированным в культуру; важности задач группового выживания
Историко-институциональная	Равноправии интересов природы, секторов экономики и будущих поколений; интеграции институциональных решений по экономической и экологической политике; создании институциональной долговременной политики защиты интересов природы; целостности принимаемых решений вместо частных, основанных на иерархии ценностей
Этико-утопическая	Новых личных ценностях систем (заботе о природе и будущих поколениях, удовлетворении насущных потребностей) и новых социальных целях (устойчивом состоянии); балансе отношений между эффективностью, распределением и масштабом; стремлении к малой активности и контролю побочных результатов («малое является красивым»); долговременной политике, предусматривающей смену ценностей и поощрение граждан (альтруизм) в противовес индивидуализму (эгоистическому поведению)

в странах мира по факту достигнутого прогресса. А динамика развития изучается по статистической отчетности за интересующий период времени. Недостаток такого подхода связан с неоднозначностью получаемых результатов от прилагаемых усилий (управляющих воздействий), что объясняется чрезвычайной сложностью системы «экономика – экология – общество» и неразвитостью теории и методов оценки ее устойчивости.

В 2015 г. Генеральная Ассамблея ООН одобрила документ «Преобразование нашего мира. Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 г.», в котором заявлено 17 целей и 169 задач, направленных на сбалансирование основных составляющих устойчивого развития, так как цели экономического, экологического и социального развития содержат между собой серьезные противоречия и их одновременное дос-

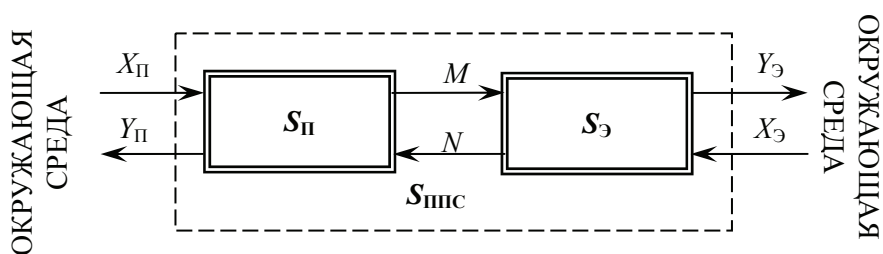


Рис. 1. Структурная схема ППС

тижение представляет сложную научную проблему. Ее решение должно быть основано на использовании методов системного анализа, математического моделирования и управления природо-промышленными системами (ППС) [1].

Природо-промышленные системы представляют собой множество объектов отраслей промышленного производства  $S_{\Pi}$  и природной среды  $S_{\mathcal{E}}$ , образующих единую технико-экономическую и экологическую структуру рассматриваемого региона, упорядоченно взаимодействующих друг с другом в процессах обмена информацией, потребления материально-энергетических ресурсов и переработки отходов. Природо-промышленные системы относятся к классу термодинамически открытых макросистем с иерархической структурой соединения элементов, детерминировано-стохастической природой процессов, нелинейным характером их поведения и запаздыванием сигналов в каналах связи.

На рисунке 1 показана схема эколого-экономических взаимодействий промышленной  $S_{\Pi}$  и экологической  $S_{\mathcal{E}}$  подсистем. Связующие переменные  $M$  и  $N$  формально выражают уровень экономической активности в  $S_{\Pi}$  и качество природной среды в  $S_{\mathcal{E}}$ . А взаимодействие подсистем представимо в форме

$$\dot{M} = F(M, N, X_{\Pi}, Y_{\Pi}); \quad \dot{N} = G(M, N, X_{\mathcal{E}}, Y_{\mathcal{E}}),$$

где  $\dot{M}$  и  $\dot{N}$  – производные по времени;  $X_{\Pi}$ ,  $X_{\mathcal{E}}$  и  $Y_{\Pi}$ ,  $Y_{\mathcal{E}}$  – внешние входные и выходные воздействия, а  $F$  и  $G$  – функциональные операторы, принимающие положительные или отрицательные значения.

Поскольку  $M$  и  $N$  находятся в прямой и обратной связях  $S_{\Pi}$  с  $S_{\mathcal{E}}$ , рост  $N$  будет «полезен» для  $S_{\Pi}$ , рост  $M$  «опасен» для  $S_{\mathcal{E}}$ . С позиции системы «хищник – жертва» поведение  $S_{\Pi}$  напоминает «хищника»;  $S_{\mathcal{E}}$  – «жертву». Устойчивое функционирование конкретных ППС зависит от множества всех положительных и отрицательных обратных связей, свойственных данным системам.

Нестабильность поведения  $S_{\Pi}$  и  $S_{\mathcal{E}}$  является основанием для формулирования «правила меры преобразования природных систем» [2] и трех принципов «менеджмента устойчивого развития» [4]. Принцип 1 свидетельствует о том, что «объем добычи возобновляемых ресурсов (ВР) в заданный период времени не должен превышать их естественного прироста в том же периоде времени». То есть устойчивое потребление ВР обеспечи-

вается при равных показателях объемов потребления и самовосстановления либо если темп потребления оказывается меньше темпа самовосстановления.

Использование невозобновляемых природных ресурсов в любом случае снижает объем их доступных фондов для будущих поколений людей. Поэтому принцип 2 утверждает: «невозобновляемые ресурсы можно разрабатывать в той мере, в какой их сокращение будет скомпенсировано (замещено) за счет антропогенного ресурса для других поколений людей».

Предполагая, что природная среда обладает определенным ассимиляционным потенциалом поглощения и переработки отходов, принцип 3 сформулирован так: «эмиссии должны быть всегда меньше уровня ассимиляционной способности природной среды».

Практическое использование принципов экологического менеджмента эффективно только в том случае, когда определены допустимые значения темпов потребления ресурсов, ассимиляционные потенциалы природных сред, возможности компенсационных замещений и многое другое. Для их расчета необходимы математические модели подсистем  $S_{\Pi}$  и  $S_{\Sigma}$ .

Оценка результативности принципа 3 в аспекте устойчивости эколого-экономических взаимодействий  $S_{\Pi}$  и  $S_{\Sigma}$  возможна, например, в соответствии со структурой ППС, показанной на рис. 2, где подсистема  $S_{\Pi}$  описывается линейной моделью, а  $S_{\Sigma}$  – нелинейной характеристикой типа «клапан». В качестве критерия устойчивости можно воспользоваться критерием абсолютной устойчивости [3], характеризующим асимптотическую устойчивость системы в целом, то есть относительно всего пространства ее состояний. Проверка устойчивости по данному критерию означает, что при любых отклонениях начальных данных от расчетных разность отклонений истинного процесса от расчетного должна убывать и стремиться к нулю при  $t \rightarrow \infty$ .

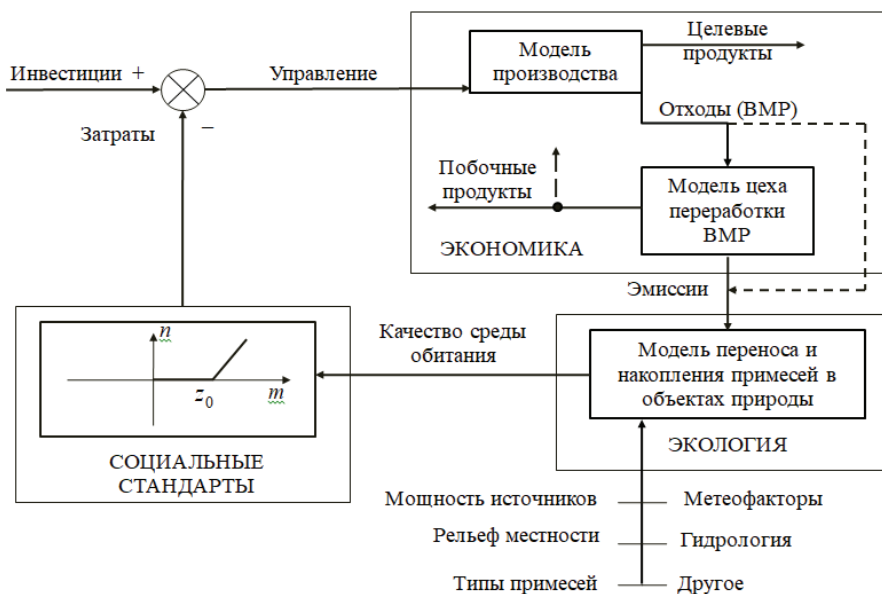


Рис. 2. Схема проверки ППС на устойчивость

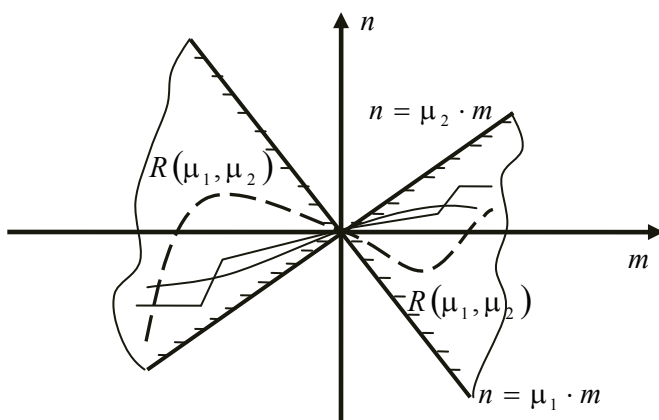


Рис. 3. Нелинейности класса  $R$

Для природо-промышленных систем характерен вариант, когда нелинейная характеристика известна не полностью, а лежит в некотором заданном секторе (рис. 3). То есть неполное задание нелинейности, описывающей  $S_3$ , означает задание некоторого класса нелинейностей  $R$ , свойственных  $S_3$ .

Нелинейность типа «клапан» соответствует ситуации, когда концентрационная нагрузка на природу до порогового значения  $z_0$  не приводит к серьезным потерям в  $S_3$ , но свыше  $z_0$  возникают существенные экономические ущербы, отражающиеся на экономических показателях  $S_{II}$ . В общем случае класс нелинейностей может представлять собой множество  $R[\mu_1, \mu_2]$  всех кусочно-непрерывных функций, графики которых представлены на рис. 3.

Для данного класса нелинейностей применим круговой критерий абсолютной устойчивости ППС, в котором входы  $n(t)$  и входы  $m(t)$  удовлетворяют условиям

$$\mu_1 \leq \frac{n(t)}{m(t)} \leq \mu_2 \text{ при } m(t) \neq 0; \quad n(t) = 0 \text{ при } m(t) = 0. \quad (1)$$

Иначе говоря, точка  $[n(t), m(t)]$  всегда находится в двухполостном секторе  $R[\mu_1, \mu_2]$  между прямыми  $n = \mu_1 m$  и  $n = \mu_2 m$  на плоскости  $\{n, m\}$ , включая эти прямые. Критерий (1) также может быть расширен и на нелинейные нестационарные звенья

$$n(t) = \varphi[m(t), t],$$

где  $\varphi(m, t)$  – функция, удовлетворяющая условию

$$\mu_1 \leq \frac{\varphi(m, t)}{m} \leq \mu_2 \text{ при } m \neq 0.$$

Для проверки  $S_{ППС}$  на устойчивость в конкретной ситуации необходимо построить модель  $S_{II}$  и определить вид нелинейного описания  $S_3$ .



### Список литературы

1. **Попов Н. С., Бьянко В., Лысенко И. О.** Повышение энергоэффективности природо-промышленных систем: учеб. пособие. Тамбов: Изд-во Першина Р. В., 2014. 146 с.
2. **Реймерс Н. Ф.** Экология (теория, законы, правила, принципы и гипотезы). М.: Россия Молодая", 1994. 367 с.
3. **Фельдбаум А. А., Бутковский А. Г.** Методы теории автоматического управления. М.: Наука, 1971. 744 с.
4. **Эндрес А., Квернер И.** Экономика природных ресурсов: учеб. пособие. 2-е изд. СПб.: Питер, 2004. 256 с.
5. **Bergh Jeroen C.J.M. Van Den.** Ecological Economics and Sustainable Development: Theory, Methods and Applications. Edward Elgar Publishing, Inc., 1996. 312 p.

### References

1. **Popov N.S., B'yanko V., Lysenko I.O.** *Povyshenie energoeffektivnosti prirodno-promyshlennykh sistem* [Increase of energy efficiency of natural-industrial systems: Textbook. Allowance], Tambov: Izdatel'stvo Pershina R. V., 2014, 146 p. (In Russ.)
2. **Reimers N.F.** *Ekologiya (teoriya, zakony, pravila, printsipy i gipotezy)* [Ecology (theory, laws, rules, principles and hypotheses)], Moscow: Rossiya Molodaya, 1994, 367 p. (In Russ.)
3. **Fel'dbaum A.A., Butkovskii A.G.** *Metody teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Methods of automatic control theory], Moscow: Nauka, 1971, 744 p. (In Russ.)
4. **Endres A., Kverner I.** *Ekonomika prirodnnykh resursov* [Economics of Natural Resources: Textbook. Allowance], St. Petersburg: Piter, 2004, 256 p. (In Russ.)
5. **Bergh Jeroen C.J.M. Van Den.** *Ecological Economics and Sustainable Development : Theory, Methods and Applications*, Edward Elgar Publishing, Inc., 1996, 312 p.

## CHARACTERISTICS AND PARAMETERS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF ECONOMICS, NATURE AND SOCIETY AS A COMPLEX SYSTEM: SOCIAL AND ECOLOGICAL PERSPECTIVE OF THE PROBLEM

**N. S. Popov**, *Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Department of Environmental Management and Protection,  
Tambov State Technical University;  
eco@nnn.tstu.ru*

**O. V. Peshcherova**, *Assistant,  
Department of Environmental Management and Protection,  
Tambov State Technical University,  
eco@nnn.tstu.ru*

**A. E. Strelnikova**, *Economist,  
PLC Izvestnyak,  
eco@nnn.tstu.ru*

*The paper considers the concept of maximum permissible loads on nature which in the late 1980s and early 1990s led to the formulation of the concept of "sustainable development". The authors sufficiently generalize the content of modern scientific*



*approaches to the study of the problem of sustainable development. As a result, it follows that the sustainability assessment is based on a variety of indices and indicators that reflect different aspects of the socio-economic, social, legal and environmental situation in the world. This leads to ambiguous results from the efforts made, which is explained by the extreme complexity of the system “economy – environment – society – law”. Thus, the balance of the main components of sustainable development presents a complex scientific problem in our time.*

*Keywords:* threshold level; theory of management; sustainable development; environmental and industrial systems; eco-equity.

© Н. С. Попов, 2018

© О. В. Пешерова, 2018

© А. Э. Стрельникова, 2018

*Статья поступила в редакцию 20.11.2017*