

## **Теория и практика устойчивого экономического развития**

УДК 631/635

DOI: 10.17277/voprosy.2020.03.pp.040-055

### **О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ В ПОСТАНОВКЕ И РЕШЕНИИ РЕГИОНАЛЬНЫХ ЗАДАЧ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ. ЧАСТЬ II\***

**Н. С. Попов, О. В. Пещерова, А. А. Чуксин**

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный  
технический университет»;*

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный  
университет имени Г. Р. Державина», г. Тамбов, Россия*

*Рецензент д-р техн. наук, профессор В. Н. Шамкин*

**Ключевые слова:** искусственный интеллект; множество целеустремленных состояний; принципы прогнозирования будущего; природа-промышленные системы; теория управления; устойчивое развитие; эволюция.

**Аннотация:** В условиях нарастающих противоречий между жизненно необходимыми потребностями современного общества в природных благах и ограниченной способностью биосферы в их воспроизводстве проблема устойчивого развития земной цивилизации с каждым годом становится все более актуальной. От глубокого понимания ее содержания и научного осмысления причин возникновения зависит выбор эффективных методов решения. В данной работе проблема устойчивого развития рассматривается с позиции долгосрочного управления макросистемами, к которым относятся природа-промышленные системы (ППС), представляющие особую важность для экономического развития регионов России. Сложность ППС как объектов управления требует использования неклассических подходов к определению траектории их движения к целям устойчивого развития.

---

\* Часть I см. журнал «Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского», № 2 (76), 2020, с. 91 – 106.

Попов Николай Сергеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Природопользование и защита окружающей среды», e-mail: eco@nnn.tstu.ru; Пещерова Ольга Викторовна – старший преподаватель кафедры «Природопользование и защита окружающей среды», ТамбГТУ, г. Тамбов, Россия; Чуксин Антон Андреевич – врач-ординатор, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», г. Тамбов, Россия.

## Целеустремленные состояния природо-промышленных систем

В первой части настоящей работы показано, что объектами управления в проблеме регионального устойчивого развития являются природо-промышленные системы (ППС), относящиеся к категории целеустремленных и саморазвивающихся [1]. Их поведение направляется целью и зависит от условий внешнего окружения. Разнообразие и интенсивность действия внешних факторов таковы, что «обязывают» менеджеров постоянно анализировать важнейшие технико-экономические показатели систем и, в первую очередь, надежность, устойчивость и чувствительность, имеющие ключевое значение при управлении ППС, и улучшать их при первой необходимости. Однако наряду с внешними причинами существуют и внутренние, также побуждающие административно-хозяйственный персонал проводить существенные изменения в объектах управления в случаях отказа элементов, износа оборудования, несовершенства локальных систем управления, некачественного сервиса и прочих нежелательных обстоятельств. Во всех такого рода «проблемных ситуациях» (ПС)<sup>1</sup>, понимая под этим неспособность движения ППС<sup>2</sup> к целям устойчивого развития (ЦУР), необходимо проводить в объекте управления эволюционные действия (ЭД), направленные на преодоление ПС.

Основная причина возникновения ПС объясняется либо несоответствием требований технологического (уставного) регламента их реальному состоянию, либо физической неисполнимостью предписанного закона управления промышленной подсистемой. Результаты возникновения ПС проявляются в неустраняемых рассогласованиях выходных показателей ППС с заявленными ЦУР. В таких ситуациях принятие решений по преодолению ПС должно строиться прежде всего на знании того, в каком конкретном классе нештатных состояний оказалась система в процессе управления. Только по результатам его диагностики возможен правильный выбор соответствующих ЭД.

Пусть все допустимые трансформации в промышленной подсистеме  $S_{\Pi}$  [1, с. 97], образуют множество состояний  $H$ , определяемое по формуле

$$H = H_c \times H_{\phi}, \quad (1)$$

где  $H_c$  и  $H_{\phi}$  – соответственно множества ее структурных и функциональных изменений;  $\times$  – знак декартова произведения.

В множестве состояний  $H$  выделим подмножество так называемых «целеустремленных состояний» [2]  $H_{\Pi} \subset H$ , порождаемых ЭД в  $S_{\Pi}$ , элементы которого  $h \in H_{\Pi}$  являются набором состояний в окружении выбора, в которые необходимо осуществить перевод  $S_{\Pi}$  из ПС, ориентируясь на ЦУР.

---

<sup>1</sup> Термин «проблемная ситуация» означает выход системы на границу своих потенциальных (предельных) возможностей.

<sup>2</sup> Под словом «движение» понимается улучшение показателей развития ППС во времени.

В отношении  $H_{ц}$  сформулируем ряд гипотез.

1. Любое состояние  $h \in H_{ц}$  интегративно учитывает особенности как самой  $S_{П}$ , так и ее внешнего окружения при реализации ЭД.

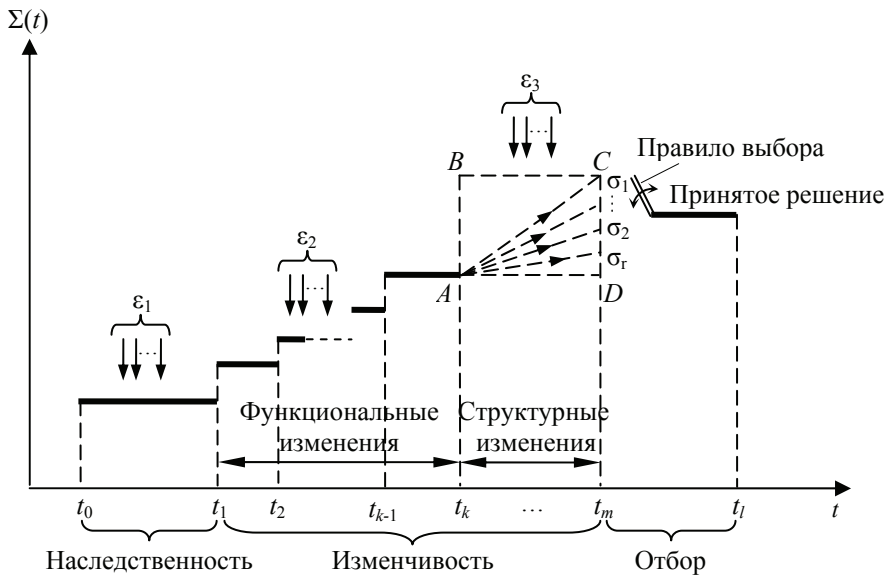
2. Выбор значений  $h$  можно характеризовать одним показателем, имеющим вероятностную природу и удовлетворяющим условиям нормировки.

3. Смена  $h$  приводит к изменению операторов  $F_1(h)$  и  $F_2(h)$  в модели (1) [1].

4. Если для развивающихся ППС множество целеустремленных состояний (МЦС) меняется во времени, тогда  $H_{ц}$  следует рассматривать как функцию  $H_{ц}(t)$ .

5. Изменение состава  $H_{ц}(t)$  вызывается многими причинами: обновлением или добавлением компонентов в ППС, расширением условий эксплуатации, корректировкой ЦУР и т.п.

На рисунке 1 изображен фрагмент эволюционного развития подсистемы  $S_{П}$ , демонстрирующий ее переходы в целеустремленные состояния в моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_m$  и согласующийся с категориями «наследственной изменчивости и естественного отбора» Ч. Дарвина. Мерой развития подсистемы служит «эволюционная сложность»  $\Sigma$  [3], оцениваемая по разности внутренней сложности  $S_{П}$  и сложности ее системы управления. При отсутствии управления сложность подсистемы характеризуется совокупностью статической и динамической сложности, а сложность системы управления соответствует тому уровню вычислительной сложности, которая необходима для полной управляемости  $S_{П}$ . Вместе с тем  $\Sigma$  следует интерпретировать и как меру понимания поведения подсистемы.



**Рис. 1.** Иллюстрация процесса эволюционного развития промышленной подсистемы:  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$  – векторы возмущений;  $A, B, C, D$  – область допустимых структурных изменений;  $\dashrightarrow$  – варианты ЭД в виде возможных проектных решений;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – меры сложности ЭД

На интервале «наследственности»  $T_n = t_0 - t_1$ <sup>3</sup> целеустремленное поведение  $S_{\Pi}$  формировалось в обстановке внешних вызовов, представленных вектором  $\varepsilon_1$ . В результате согласования внутренней сложности и сложности действующих систем управления, при  $t < t_0$ ,  $\Sigma(t)$  на интервале  $T_n$  не меняется. Это означает, что состояние  $S_{\Pi}$  на  $T_n$  единственно:  $h(t) = h_n = \text{const}$ ,  $t \in [t_0, t_1)$ .

На интервале «изменчивости»  $T_n = t_1 - t_k$  действия вызовов  $\varepsilon_2$  в окружении  $S_{\Pi}$  создают различные ПС, первоначально связанные с функциональными изменениями подсистемы, например такими, как усиление или ослабление внутренних связей между элементами, сменой последовательности выполнения событий (операций), дифференциация компонентов и их свойств и многих других, ведущих к непредсказуемой заранее смене состояний  $S_{\Pi}$ . Эти спонтанные изменения состояний увеличивают энтропию  $S_{\Pi}$  и тем самым снижают понимание ее поведения. Для выхода из подобного рода ПС и уменьшения энтропии необходимы эволюционные способы действий, основанные на организационно-технических возможностях менеджмента, связанных с идентификацией изменений, перепрограммированием заданий действующим системам управления или их усовершенствованием, что позволяет перевести  $S_{\Pi}$  из состояния ПС  $h(t_{i-1})$  в целеустремленное состояние  $h(t_i)$ ,  $i = \overline{1, k}$ .

На рисунке 1 реализация возможных систем контроля и управления в условиях возникших функциональных изменений в  $S_{\Pi}$  в моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_{k-1}$  показана в порядке нарастания их сложности – от стабилизирующих одноконтурных до многоконтурных программных, следящих, экстремальных, адаптивных и др. В результате  $\Sigma(t)$ , как мера понимания поведения  $S_{\Pi}$  на подинтервалах  $T_n$ , монотонно возрастает. Какой тип систем контроля и управления будет необходим на конкретном отрезке времени, зависит от состава и характера компонент  $\varepsilon_2$ . При этом может рассматриваться  $n$ -е число возможных вариантов систем с вероятностями выбора  $p_i$ ,  $\sum_{i=1}^n p_i = 1$ . В таком случае МЦС  $H_{\Pi}(t)$  формируется из состояний  $h(t_j | p_i)$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, k-1}$ .

Интервал  $t_1 - t_k$  характерен тем, что «унаследованная» с предшествующего интервала  $T_n$  структура  $S_{\Pi}$  остается неизменной, а возникающие ПС последовательно устраняются тактическими возможностями менеджмента в результате выбора и реализации наиболее эффективных, в смысле продвижения к ЦУР, действий организационного характера, либо с помощью систем контроля и управления. При функциональных изменениях в объекте управления выход из ПС возможен со сравнительно низкими потерями в оперативном режиме и в условиях работы системы диагностики состояний  $S_{\Pi}$ .

---

<sup>3</sup> Через  $(t_i - t_{i+1})$  будем обозначать замкнутый промежуток времени от  $t_i$  до  $t_{i+1}$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots$

Отличительной особенностью ПС, возникшей в  $S_{\Pi}$  к моменту времени  $t_k$ , является необходимость реализации долгосрочных структурных преобразований в промышленной подсистеме (подобных ситуации с очистными системами канализации (ОСК) в г. Тамбове [1])<sup>4</sup>, например, связанных с включением новых функциональных элементов, перестановкой или переориентацией отдельных звеньев, объединением элементов с одинаковой структурой в более сложную конфигурацию и т.д. При этом структурные изменения естественным образом сказываются и на функциональных особенностях подсистемы, отчего их следует рассматривать в связке «структура – функции».

На рисунке 1 символами  $A, B, C, D$  условно обозначено поле допустимых изменений  $S_{\Pi}$ , ограниченное известным к моменту времени  $t_k$  уровнем технологического развития той отрасли хозяйства, к которой относится ППС, а также результатами наилучших мировых практик в сфере организации деятельности интересующей промышленной подсистемы. Выбор оптимального варианта проектных решений по переводу  $S_{\Pi}$  из  $h(t_k)$  в МЦС  $H_{\Pi}(t_m)$  осуществляется из определенного числа  $r$  альтернативных вариантов.

Для формального описания движения ППС к ЦУР воспользуемся некоторыми базовыми понятиями и определениями, характеризующими поведение целеустремленных систем [2].

1. *Субъектом*, проявляющим целеустремленное поведение в ситуации выбора эволюционного способа действия назовем лицо, принимающее решение (ЛПР).

2. *Окружение выбора* ЛПР в ППС представим системой возмущений (вызовов), отождествляемых с  $\varepsilon$ .

3. *Множество эволюционных способов действий*, доступных ЛПР, обозначим символом  $C$ .

4. *Вероятность выбора* ЛПР конкретного способа действий  $C_i$  в окружении  $\varepsilon$

$$p_i = p\{C_i | \text{ЛПР в } \varepsilon\}. \quad (2)$$

5. *Результатом* выбранного способа действий будем считать изменение состояний ППС, а именно  $h \in H_{\Pi}$ .

6. *Вероятность результата* действия, получаемого в конкретной ситуации выбора

$$p(h_j) = \sum_i p_i E_{ij}, \quad (3)$$

где  $E_{ij}$  – эффективность каждого возможного эволюционного способа действия  $C_i$  по каждому возможному результату  $h_j$ ,  $\sum_i E_{ij} = 1$ .

7. *Удельные ценности* каждого результата  $h_j$  для ЛПР обозначим символом  $W_j$ .

<sup>4</sup> Также см. Постановление администрации г. Тамбова от 24.01.2020 г. № 307 [4].

8. Ожидаемая ценность результата равна

$$EW = \sum_i \sum_j p_i E_{ij} W_j . \quad (4)$$

На основании (2) – (4) продвижение ППС к ЦУР на интервале  $t_1 - t_m$  будет иметь место в случае, когда ожидаемая ценность (4) монотонно возрастает относительно последовательности результатов  $h_1, h_2, \dots, h_k, h_m$ .

### **Прогнозирование целей устойчивого развития ППС и планирование средств их реализации**

Сложность в осуществлении рассматриваемого этапа эволюции  $S_{II}$  на интервале  $t_k - t_m$  связана с двумя обстоятельствами:

1) прогнозированием ЦУР на период времени  $t_m + T$ , где  $T$  – время учета ресурсных интересов очередного поколения граждан;

2) планированием альтернативных вариантов ЭД, а именно, прогрессивных способов и средств достижения принятых значений ЦУР.

Различие понятий «прогнозирование» и «планирование» определяется фактором времени [5]. Типично границей планирования  $t_m$  служит срок в 15 лет, поскольку проекты всегда нуждаются в высокой точности и достоверности информации [6]. При этом надо признать, что научно-технические факторы не существуют в отрыве от социально-экономических и экологических. Они взаимосвязаны и формируют единые условия работы как отдельной ППС, так и региона в целом. С учетом этого и должны прогнозироваться значения ЦУР на период времени  $t_m + T$ .

Одним из наиболее действенных методов долгосрочного прогноза развития больших систем является сценарный, впервые представленный как метод ПАТТЕРН [7], в котором эксперты формируют целевые запросы о будущем военно-политическом, социально-экономическом и научно-техническом развитии общества, после чего оценивают альтернативные способы достижения целей. При этом сценарий развития поддерживается моделью, с помощью которой осуществляется экстраполяция существующих тенденций на будущее. Однако данный метод, как и многие другие, не свободен от критики в том, что он не столько прогнозирует будущее развитие общества, сколько «влияет» на возможность его появления в условиях сохранности сложившихся закономерностей в политике, экономике, социальной сфере и т.д.

Основная трудность при разработке долгосрочных прогнозов состоит в неопределенности и сложности прогнозируемых явлений и процессов. В условиях высоких темпов развития науки и техники не всегда следует экстраполировать сложившиеся тенденции на будущее состояние общества. Разумнее своевременное обнаружение «зачатков» принципиально новых и «вероятных в будущем» закономерностей, базируясь на опыте и комплексном анализе развития общественного прогресса квалифицированными специалистами. И чем дальше отстоит горизонт прогноза, тем

значительнее оказывается роль эвристического мышления, тем меньше степень детализации содержания прогноза и тем весомее роль долгосрочных сценариев, не поддающихся в основной своей части количественному измерению.

Наличие неопределенности в системе долгосрочного прогноза указывает на необходимость введения некоторых полезных правил, действие которых позволяет избежать принятия заведомо неверных решений. К таким правилам относятся, в частности, принципы прогнозирования будущего, способные «противостоять испытаниям времени» [8]. Их смысл состоит в следующем:

1. Ничего нельзя использовать в интересах будущего, что не может быть оправдано в настоящем.

2. В расчетах «для будущего» правильнее использовать только инвариантные величины, независимые от возможной конъюнктуры.

3. В ситуациях выбора необходимо отдавать предпочтение строгим объективным законам, а не тем, которые допускают двойное толкование.

4. Необходимо разрабатывать альтернативы с учетом их дисконтирования во времени.

5. В тех ситуациях, когда существует риск необратимых последствий, надо руководствоваться принципом осторожности типа «не навреди», хорошо известным в медицине.

6. При прогнозе лучше использовать жесткие критерии качества, а не критерии «гибкости».

Применение подобного набора предусмотрительных и прагматичных правил позволяет уменьшить возможные потери, связанные с неопределенностями долгосрочных прогнозов.

Между тем прогноз ЦУР полностью базируется на сценариях будущего социально-экономического развития региона, в конечном счете отображаемых системой индексов и индикаторов [9]. Смысл прогноза состоит в определении:

– ресурсов, которыми будет располагать общество к моменту времени прогноза;

– проблем, с которыми придется иметь дело в будущем;

– средств, с помощью которых могут решаться возникающие проблемы.

Учитывая многообразие инфраструктурных объектов экономики и горизонтов прогноза, на практике приходится использовать различные методы прогнозирования с дублированием и взаимным сопоставлением получаемых результатов.

В примере с ОСК в г. Тамбове прогноз социально-экономических ЦУР на период до 2030 г. строился на основе:

1) плана развития централизованной системы водоотведения с новых городских территорий;

2) данных о приросте потока сточной воды за рассматриваемый период времени;

3) примерного состава и концентраций органических веществ в сточных водах;

4) характеристик возможных ксенобиотиков и токсичных металлов, попадающих в канализационную сеть.

Для оценки будущего расхода и концентраций примесей использовались официальные источники информации: Стратегия социально-экономического развития Тамбовской области до 2035 г.; Региональная программа Тамбовской области по обращению с отходами, в том числе с твердыми коммунальными отходами; данные Территориального органа Федеральной службы государственной статистики по изменению численности населения Тамбовской области до 2035 г.; расчет водоотведения жилого фонда в новых микрорайонах города.

Поскольку ключевым звеном ОСК является станция биологической очистки, от устойчивой работы которой зависит эффективность функционирования всего городского комплекса очистных сооружений, результаты прогноза условий ее развития (упомянутые выше), были положены в основу определения 4-х групп ЦУР ОСК:

1. Надежности и бесперебойной работы централизованной системы водоотведения в условиях роста входной нагрузки и присутствия во входном потоке воды ингибиторов роста микроорганизмов. В их числе:

– индекс развития сети

$$v = S_n / S_r \cdot 100 \% , \quad (5)$$

где  $S_n$  – площадь территории, не имеющей централизованного водоотведения;  $S_r$  – площадь всего города;

– фактическое количество аварийных ситуаций на канализационных сетях

$$H = K / L , \quad (6)$$

где  $K$  – число отказов оборудования и засоров в год;  $L$  – протяженность сети, км;

– вероятность наступления нежелательных событий  $A$ , представляющих угрозу отравления ила в аэротенках

$$P = T_A / T_o , \quad (7)$$

где  $T_A$  – продолжительность события  $A$ ;  $T_o$  – отчетный период времени.

2. Качества очистки стоков, согласно требованиям действующих на весь период прогноза ЦУР нормативов [10].

3. Энергоэффективности и ресурсосбережения технологического оборудования. В том числе:

– удельный расход электроэнергии на перекачку стоков в канализационной сети;

– удельный расход электроэнергии на стадии аэрации воды в аэротенках;

– производство биогаза из образуемого органического осадка;

– удельное производство электроэнергии на стадии сброса очищенной воды в реку.

4. Экологической безопасности санитарно-защитной зоны и водоема-приемника очищенной воды. В том числе:



– вероятность подавления фекальных Coli-форм и патогенных микроорганизмов;

– надежность средозащитных мероприятий.

При возникновении ПС в работе ОСК требуется найти и реализовать такие проектные решения по усовершенствованию канализационной сети и технологии очистки стоков, которые «наилучшим образом» способствуют достижению предельных значений ЦУР в плане обеспечения надежности, эффективности и экологической безопасности ОСК.

### Управление ППС на множестве альтернативных структур экологической подсистемы

Обобщая все вышеизложенное на другие типы региональных ППС, можно отметить, что на отрезке  $t_k - t_m$  (см. рис. 1), осуществляется планирование альтернативных ЭД, каждое из которых ориентировано на ЦУР, обладает собственной мерой сложности и стоимостью реализации.

К моменту времени  $t_m$  промышленная подсистема  $S_{II}$  с вероятностью выбора  $p_i(h)$  оказывается в одном из целеустремленных состояний

$h \in H_{II}(t_m)$ ,  $\sum_{i=1}^r p_i = 1$ . Вопрос состоит в том, какое из них надо выбрать при

управлении. Наилучшее ЭД должно удовлетворять существующим в конкретной ситуации условиям и ограничениям и оцениваться по величине дисконтирования его стоимости на интервале времени  $t_m + T$ . Правилom выбора наилучшего инвестиционного решения может служить чистая приведенная стоимость (ЧПС), определяемая по результатам анализа альтернативных проектов методом «затраты – выгоды» [11].

С позиций государственного сектора экономики проект является рентабельным, если по результатам анализа совокупное значение ценности его чистых выгод оказалось положительным при заданном уровне дисконтной ставки на расчетном периоде времени  $t_m + T$ . Значения ЧПС рассчитываются по формуле

$$\text{ЧПС} = \sum_{t=0}^T (D_t - C_t) / (1 + i)^t, \quad (8)$$

где  $D_t$ ,  $C_t$  – соответственно значения годового дохода и затрат по проекту;  $i$  – дисконтный процент;  $t$  – время реализации проекта в годах, с момента его начала  $t_m = 0$ .

Одна из характерных особенностей данной задачи связана с неопределенностью последствий принятых решений для экологической подсистемы  $S_3$ . В случае негативного влияния проекта на окружающую среду под вопросом оказывается способность достижения в ППС целей устойчивого развития. Фактически правило принятия решений (ППР) оказывается функцией двух видов числовой информации: детерминированной (ДИ) и вероятностной (ВИ):  $\text{ППР} = f(\text{ДИ}, \text{ВИ})$ , где ДИ характеризует годовые

ценовые показатели затрат и выгод, известные в денежном выражении на момент принятия решений по проекту, а ВИ – экологические потери от его реализации.

Для определения значений ВИ используется модель типа «доза – реакция», связывающая нагрузку на природу, вызываемую проектом, с его ущербом (потерями) для окружающей среды. Такая практика известна в экологической экспертизе как «оценка воздействия на окружающую среду» (ОВОС) [12, 13]. Ее смысл заключается в выявлении и оценке степени опасности всех потенциальных видов воздействия проектируемых объектов на природу и здоровье человека, а также расчет экологических, экономических и социальных последствий этого воздействия.

Ценовые показатели затрат и выгод определяются объективно, на основе рыночного уровня цен, тогда как прогнозируемые экологические ущербы в силу неопределенности обстоятельств чаще всего рассчитываются приближенно. Первоначально они рассматриваются в натуральном выражении, а затем переводятся в денежную форму для получения однородной эколого-экономической оценки результативности проекта.

Итак, поиск наилучшего проектного решения на заданном множестве допустимых решений  $\Omega$  в конечном счете зависит от последствий в  $S_{\Sigma}$ . Степень неприемлемости этих последствий принято измерять в условных единицах – потерях, которые может понести ЛПР. Исходной информацией для данной задачи является функция потерь, зависящая от двух аргументов: принимаемого решения и ситуации с неопределенностью состояний  $S_{\Sigma}$ . Особенностью решения задачи является преобразование функции потерь в функцию риска, отражающую зависимость степени риска, на который идет ЛПР, только от одного аргумента, а именно, решения по проекту. Способ такого преобразования неоднозначен и зависит от выбранного критерия риска. От этого критерия зависит и смысл выражения «наилучшее решение», под которым надо понимать решение, минимизирующее риск. При этом неопределенность последствий в  $S_{\Sigma}$  будем рассматривать с позиций известного распределения вероятностей, заданного на множестве возможных состояний природы.

Формально задача ставится следующим образом (задача 1). Пусть с некоторым рискованным вариантом проектного решения  $\omega_i$ ,  $i = \overline{1, r}$  связаны различные сочетания неблагоприятных экологических последствий. Каждому сочетанию неблагоприятных последствий  $V_{ij}$ ,  $j = \overline{1, k}$ , способных реализоваться в результате принятия решения  $\omega_i \in \Omega$ , можно приписать вероятности  $P_i(V_{ij})$ :  $0 \leq P_i(V_{ij}) \leq 1$ . И пусть каждому сочетанию  $V_{ij}$  может быть поставлено в соответствие количественно описываемое последствие  $B_{ij}$ . Тогда величина риска  $R_i$ , сопутствующего проектному решению, определяется формулой

$$R_i = \sum_{j=1}^{k_i} P_i(V_{ij}) B_{ij}, \quad (9)$$

где  $R_i$  – средняя величина ущерба при принятии варианта проекта  $\omega_i$ .

Вариант  $\omega_i$  без учета негативных последствий определяется величиной ЧПС $_i$  из уравнения (8), а с учетом риска – результирующей оценкой эффективности решения

$$Q_i = \text{ЧПС}_i - R_i, \quad i = \overline{1, r}. \quad (10)$$

Множество всех рациональных вариантов проектных решений обозначим в виде

$$\Omega^+ := \{\omega_i \in \Omega : Q_i > 0\}, \quad (11)$$

на котором оптимальный вариант решения  $\omega_i^*$  находится следующим образом:

$$\omega_i^* = \arg \max_{\omega_i \in \Omega^+} Q_i(\omega_i), \quad i = \overline{1, r}. \quad (12)$$

Реализация проекта  $\omega_i^*$  позволяет осуществить перевод  $S_{\Pi}$  из проблемной ситуации, возникшей в момент времени  $t_k$ , в очередное целеустремленное состояние  $h \in H_{\Pi}(t_l)$ , ориентированное на ЦУР.

Рассмотренный вариант задачи 1 принятия решений в условиях неопределенности состояния экологической подсистемы относится к категории задач планирования, не всегда требующих математического описания ППС. Вследствие этого возможны просчеты в определении  $\omega_i^*$ . Между тем повышение надежности выбранного решения может быть связано с задачами управления, использующими математические модели ППС. Один из вариантов задачи управления ППС на множестве альтернативных структур  $S_{\Sigma}$  сформулируем следующим образом (задача 2).

Будем полагать известным конечное множество целеустремленных состояний  $h \in H_{\Pi}(t_m)$ . И пусть смена  $h$  означает смену функциональных операторов  $F_1(h), F_2(h), \Phi_1(h), \dots, \Phi_4(h)$  в модели ППС следующего вида [1, с. 97]

$$\begin{aligned} y_{\Pi} &= F_1(h)(r_{\Pi}, u_{\Pi}, z_{y_{\Sigma}}^A, z_{y_{\Sigma}}^B); & z_{y_{\Pi}} &= F_2(h)(r_{\Pi}, u_{\Pi}, z_{y_{\Sigma}}^A, z_{y_{\Sigma}}^B); \\ y_{\Sigma}^A &= \Phi_1(h)(r_{\Sigma}, u_{\Sigma}, z_{y_{\Pi}}, y_{\Sigma}^B); & y_{\Sigma}^B &= \Phi_2(h)(r_{\Sigma}, u_{\Sigma}, z_{y_{\Pi}}, y_{\Sigma}^A); \\ z_{y_{\Sigma}}^A &= \Phi_3(h)(r_{\Sigma}, u_{\Sigma}, z_{y_{\Pi}}, z_{y_{\Sigma}}^B); & z_{y_{\Sigma}}^B &= \Phi_4(h)(r_{\Sigma}, u_{\Sigma}, z_{y_{\Pi}}, z_{y_{\Sigma}}^A), \end{aligned} \quad (13)$$

где  $r_{\Pi}, u_{\Pi}$  и  $r_{\Sigma}, u_{\Sigma}$  – соответственно векторы наблюдаемых и управляемых переменных;  $z_{y_{\Pi}} \equiv z_{x_{\Sigma}}$  и  $z_{x_{\Pi}} \equiv z_{y_{\Sigma}}$  – векторы переменных, связывающих прямой и обратной связью подсистемы  $S_{\Pi}$  и  $S_{\Sigma}$ ;  $A$  и  $B$  – индексы, обозначающие абиотические и биотические компоненты соответственно;  $y_{\Pi}, y_{\Sigma}$  – векторы выходных переменных  $S_{\text{ППС}}$ .

Будем считать, что  $u_{\Sigma}, r_{\Sigma}, u_{\Pi}, r_{\Pi}, y_{\Sigma}^A, y_{\Sigma}^B, z_{y_{\Pi}}, y_{\Pi}, z_{y_{\Sigma}}^A, z_{y_{\Sigma}}^B$  принадлежат к конечномерным евклидовым пространствам  $U_{\Sigma}, R_{\Sigma}, U_{\Pi}, R_{\Pi}, Y_{\Sigma}^A, Y_{\Sigma}^B, Z_{y_{\Pi}}, Y_{\Pi}, Z_{y_{\Sigma}}^A, Z_{y_{\Sigma}}^B$  соответственно.

Систему планово-экономических требований и ограничений на технологические переменные и управляющие воздействия зададим в виде:

$$M(r_{\Pi}, y_{\Pi}, u_{\Pi}) = 0; \quad G(z_{\text{уп}}) \geq 0; \quad (14)$$

$$u_{\Pi} \in U_{\Pi}(r_{\Pi}) \subseteq U'_{\Pi}; \quad u_{\text{э}} \in U_{\text{э}}(r_{\text{э}}) \subseteq U'_{\text{э}}. \quad (15)$$

Представим частную целевую функцию в виде отображения

$$Q: Y_{\Pi} \times U_{\Pi} \times R_{\Pi} \times Y_{\text{э}}^A \times Y_{\text{э}}^B \times U_{\text{э}} \rightarrow \chi, \quad (16)$$

где  $\chi$  – множество, в общем случае частично упорядоченное отношением « $\geq$ ».

Будем считать, что каждому элементу множества  $H$  альтернативных структур  $S_{\text{э}}$  поставлена в соответствие мера  $P(h)$  – вероятность появления структуры  $h \in H$ . При фиксированном  $h \in H$  обозначим частную целевую функцию  $Q_h(u_{\Pi}, u_{\text{э}}, r_{\Pi})$  в виде

$$Q_h(u_{\Pi}, u_{\text{э}}, r_{\Pi}) = Q(y_{\Pi}, u_{\Pi}, r_{\Pi}, y_{\text{э}}^A, y_{\text{э}}^B, u_{\text{э}}), \quad (17)$$

где  $y_{\Pi}, y_{\text{э}}^A, y_{\text{э}}^B$  определяются из (13).

Тогда при известной структуре  $h$  задание  $u_{\Pi} \in U_{\Pi}$ ,  $u_{\text{э}} \in U_{\text{э}}$ ,  $r_{\Pi} \in R_{\Pi}$  определяет значение  $Q_h$ , численно характеризующее эффект действия управлений  $u_{\Pi}$ ,  $u_{\text{э}}$ .

Целевую функцию  $J$ , численно оценивающую результат реализации управлений  $u_{\Pi}$ ,  $u_{\text{э}}$ , с учетом вероятности различных альтернативных структур  $S_{\text{э}}$  можно представить в виде

$$J(u_{\Pi}, u_{\text{э}}, r_{\Pi}) = \sum_{h \in H} P(h) Q_h(u_{\Pi}, u_{\text{э}}, r_{\Pi}). \quad (18)$$

В этом случае задача управления ППС формулируется следующим образом: для заданных  $r_{\Pi}$  и  $r_{\text{э}}$  найти такие управляющие воздействия  $u_{\Pi}^* \in U_{\Pi}(r_{\Pi}) \subseteq U'_{\Pi}$ ,  $u_{\text{э}}^* \in U_{\text{э}}(r_{\text{э}}) \subseteq U'_{\text{э}}$ , при которых для каждого  $h \in H$  выполняются условия и ограничения (13) – (15) и для всех  $u_{\Pi} \in U_{\Pi}$  и  $u_{\text{э}} \in U_{\text{э}}$ , при которых для каждого  $h \in H$  выполняются (13) – (15), справедливо

$$J(u_{\Pi}^*, u_{\text{э}}^*, r_{\Pi}) \geq J(u_{\Pi}, u_{\text{э}}, r_{\Pi}). \quad (19)$$

Смысл задачи 2 заключается в том, чтобы найти управляющие воздействия, при которых система технологических условий будет выполнена несмотря на то, какие именно изменения произойдут в структуре экологической подсистемы, и среди множества возможных управлений необходимо выбрать такие, при которых достигается максимума усредненное по вероятности возникновения альтернативных структур значение целевой функции. При этом значение  $P(h)$  в (18) можно оценить либо методом имитационного эксперимента по модели (13), либо методом экспертных оценок.

Принципиальное различие задач 1 и 2 состоит в том, что в первой из них рассматривается переход ППС из проблемной ситуации в единственное целеустремленное состояние, тогда как во второй задаче требуется все МЦС, и заранее неизвестно, в каком из них окажется ППС в процессе управления. Все будет зависеть от случайностей, действующих на момент принятия окончательного решения.

### **Заключение**

Проблема устойчивого развития городских макросистем на длительном периоде времени относится к числу фундаментальных научных направлений современной теории управления. От результатов исследований в этой области знаний зависит успех в решении многочисленных практических задач региональной экономики. Формально объектами управления оказываются природо-промышленные системы, представляющие собой целеустремленные и развивающиеся при участии менеджмента организации. Целями их устойчивого развития являются социально-экономические и экологические индикаторы, выражающие интересы не только настоящих, но и будущих поколений людей.

Два аспекта в задачах управления ППС отличают их от ранее известных в классической теории управления:

1. Эволюционирование ППС под действием качественно новых вызовов (возмущений), возникающих в процессе длительной эксплуатации.

2. Использование в системе оперативного управления двух нетрадиционных подсистем: долгосрочного прогнозирования ЦУР и планирования организационно-технических средств их достижения.

От выбора стратегии управления, реализуемой на множестве целеустремленных состояний ППС, зависит эффективность продвижения системы к ЦУР. Анализ задачи управления устойчивым развитием ППС позволяет сделать следующие выводы:

1. В современной практике широко используется подход к эволюции ППС, основанный на поэтапном представлении жизненного цикла системы: проектирования, строительства, функционирования, модернизации и т.д. Его недостаток состоит в том, что этапы проектирования и строительства вносят существенное запаздывание в контур управления и, как следствие, приводят к полной потере эффективности системы управления устойчивым развитием на данных этапах.

2. Второй известный подход к эволюции ППС основан на проектировании многофункциональных (гибких по назначению) объектов совместно с системами адаптивного управления, что позволяет управлять системой в условиях неопределенности будущих вызовов.

3. Третий подход использует идеи управления объектами со случайной структурой. В нем в процессе оптимизации требуется заблаговременно оценивать состояние новой структуры объекта и соответствующим образом менять алгоритм управления. Такой подход оправдан лишь в ситуациях, когда структурные изменения в объекте управления реализуемы в оперативном режиме.

4. Четвертый подход, назовем его «смарт-проектом», оригинален тем, что проектируемые на длительный срок эксплуатации объекты управления должны обладать особыми возможностями в отношении будущих вызовов. Достигается это разработкой такого организационно-технологического варианта объекта, который в своей базовой основе допускает структурно-функциональные преобразования, адекватные будущим вызовам окружения. Вопрос о заблаговременном эволюционном планировании улучшений в объекте при этом может решаться в процессе его эксплуатации с помощью интеллектуальной системы сопровождения, встроенной в систему управления устойчивым развитием.

Иначе говоря, «смарт-проект» обеспечивает возможность адаптивного развития объектов региональной экономики за счет использования модульных конструкций, трансформируемых комплексов, гибких технологических процессов и интеллектуальных систем принятия решений при выборе эволюционных способов действий.

#### *Список литературы*

1. Попов, Н. С. О некоторых особенностях в постановке и решении региональных задач устойчивого развития. Часть I / Н. С. Попов, О. В. Пещерова, А. А. Чуксин // *Вопр. соврем. науки и практики*. Университет им. В. И. Вернадского. – 2020. – № 2 (76). – С. 91 – 106. doi: 10.17277/voprosy.2020.02.pp.091-106
2. Акофф, Р. О целеустремленных системах / Р. Акофф, Ф. Эмери ; пер. с англ. Г. Б. Рубальского ; под ред. И. А. Ушакова. – М. : Сов. радио, 1974. – 272 с.
3. Касти, Дж. Большие системы. Связность, сложность и катастрофы / Дж. Касти ; пер. с англ. под ред. Ю. П. Гупало, А. А. Пионтковского. – М. : Мир, 1982. – 216 с.
4. Об утверждении схемы водоотведения города Тамбова на период 2020 – 2037 годы : постановление администрации города Тамбова от 01.12.2017 г. № 7445 (ред. от 24.01.2020 г.). – Текст : электронный // КонсультантПлюс. – URL : <http://www.consultant.ru/regbase/cgi/online.cgi?req=doc;base=RLAW444;n=132287#07458979662024461> (дата обращения: 29.06.2020).
5. Саркисян, С. А. Прогнозирование развития больших систем / С. А. Саркисян, Л. В. Голованов. – М. : Статистика, 1975. – 192 с.
6. Янч, Э. Прогнозирование научно-технического прогресса : пер. с англ. / Э. Янч ; общ. ред. и предисл. Д. М. Гвишиани. – 2-е изд., доп. – М. : Прогресс, 1974. – 585 с.
7. Лопухин, М. М. Паттерн – метод планирования и прогнозирования научных работ / М. М. Лопухин. – М. : Сов. радио, 1971. – 160 с.
8. Boersema, J. J. How to Prepare for the Unknown? On the Significance of Future Generations and Future Studies in Environmental Policy / J. J. Boersema // *Environmental Values*. – 2001. – Vol. 10, No. 1. – P. 35 – 58.
9. Тарасова, Н. П. Индексы и индикаторы устойчивого развития / Н. П. Тарасова, Е. Б. Кручинина // *Устойчивое развитие : природа – общество – человек : тезисы докладов Междунар. конф., 5–6 июня 2006 г., Москва*. – М., 2006. – Т. 2. – С. 127 – 144.
10. СанПиН 2.1.5.980-00 Гигиенические требования к охране поверхностных вод. Санитарные правила и нормы. – Текст : электронный // Минздрав России. –

URL : <https://meganorm.ru/Data2/1/4294848/4294848185.htm> (дата обращения: 29.06.2020).

11. Паавола, Й. Основы экономики окружающей среды : учеб. : пер. с фин. / Й. Паавола. – М. : [б. и.], 1999. – 296 с.

12. Опекунов, А. Ю. Экологическое нормирование и оценка воздействия на окружающую среду : учеб. пособие / А. Ю. Опекунов. – СПб. : Изд-во Санкт-Петербургского гос. ун-та, 2006. – 260 с.

13. Дончева, А. В. Экологическое проектирование и экспертиза. Практика : учеб. пособие / А. В. Дончева. – М. : Аспект Пресс, 2002. – 286 с.

### References

1. Popov N.S., Peshcherova O.V., Chuksin A.A. [About Some Features in the Statement and Solution of Regional Tasks of Sustainable Development. Part I], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2020, no. 2 (76), pp. 91-106, doi: 10.17277/voprosy.2020.02.pp.091-106 (In Russ., abstract in Eng.)

2. Akoff R., Emeri F., Ushakov I.A. [Ed.] *O tselestremlennykh sistemakh* [On purposeful systems], Moscow: Sovetskoye radio, 1974, 272 p. (In Russ.)

3. Kasti Dzh., Gupalo Yu.P., Piontkovsky A.A. [Eds.] *Bol'shiye sistemy. Svyaznost', slozhnost' i katastrofy* [Large systems. Connectivity, Complexity, and Disasters], Moscow: Mir, 1982, 216 p. (In Russ.)

4. <http://www.consultant.ru/regbase/cgi/online.cgi?req=doc;base=RLAW444;n=132287#07458979662024461> (accessed 29 June 2020).

5. Sarkisyan S.A., Golovanov L.V. *Prognozirovaniye razvitiya bol'shikh sistem* [Forecasting the development of large systems], Moscow: Statistika, 1975, 192 p. (In Russ.)

6. Yanch E., Gvishiani D.M. [Ed.] *Prognozirovaniye nauchno-tekhnicheskogo progressa* [Forecasting scientific and technological progress], Moscow: Progress, 1974, 585 p. (In Russ.)

7. Lopukhin M.M. *Pattern – metod planirovaniya i prognozirovaniya nauchnykh rabot* [Pattern - a method of planning and forecasting scientific works], Moscow: Sovetskoye radio, 1971, 160 p. (In Russ.)

8. Boersema J.J. How to Prepare for the Unknown? On the Significance of Future Generations and Future Studies in Environmental Policy, *Environmental Values*, 2001, vol. 10, no. 1, pp. 35-58.

9. Tarasova N.P., Kruchinina Ye.B. *Ustoychivoye razvitiye: priroda - obshchestvo - chelovek* [Sustainable development: nature - society - man], Abstracts of the International Conference, 5-6 June, 2006, Moscow, 2006, vol. 2, pp. 127-144. (In Russ.)

10. <https://meganorm.ru/Data2/1/4294848/4294848185.htm> (accessed 29 June 2020).

11. Paavola Y. *Osnovy ekonomiki okruzhayushchey sredy: uchebnyk* [Fundamentals of Environmental Economics: textbook], Moscow: [b. i.], 1999, 296 p. (In Russ.)

12. Opekunov A.Yu. *Ekologicheskoye normirovaniye i otsenka vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredy: uchebnoye posobiye* [Ecological regulation and environmental impact assessment: a tutorial], St. Petersburg: Izdatel'stvo Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta, 2006, 260 p. (In Russ.)

13. Doncheva A.V. *Ekologicheskoye proyektirovaniye i ekspertiza. Praktika: uchebnoye posobiye* [Environmental design and expertise. Practice: tutorial], Moscow: Aspekt Press, 2002, 286 p. (In Russ.)

## **On Formulation and Solution of Regional Sustainable Development Problems. Part II**

**N. S. Popov, O. V. Peshcherova, A. A. Chuksin**

*Tambov State Technical University;  
G. R. Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russia*

**Keywords:** artificial intelligence; set of purposeful states; principles of forecasting the future; natural-industrial systems; control theory; sustainable development, evolution.

**Abstract:** Amid growing controversy between the vital needs of modern society for natural benefits and the limited ability of the biosphere to reproduce them, the problem of sustainable development of human civilization becomes more and more urgent every year. The choice of effective methods of solution depends on a deep understanding of its content and scientific understanding of the causes of its occurrence. In this paper, the problem of sustainable development is considered from the perspective of long-term management of macrosystems, which include natural-industrial systems (NISs), which are of particular importance for the economic development of Russian regions. The complexity of the NISs as objects of management requires the use of non-conventional approaches to determining the trajectory of their movement towards the goals of sustainable development.

---

© Н. С. Попов, О. В. Пещерова, А. А. Чуксин, 2020