

# ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ МЕХАНИЗМЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТА

**Цыганов В.В.**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия*  
bbc@ipu.ru

*Аннотация. Разработана теория и методология построения систем устойчивого развития транспорта на основе экономики используемых природных ресурсов и уменьшения загрязнения окружающей среды. Управление этими системами обеспечивают организационные механизмы устойчивого развития транспорта, включающие цифровые процедуры прогнозирования с обучением, планирования, распределения ресурсов и стимулирования.*

*Ключевые слова: транспорт, устойчивое развитие, ресурсосбережение, загрязнение, управление, обучение, адаптация.*

## **Введение**

Парадигма устойчивого развития (англ. – sustainable development) предполагает обеспечение текущих потребностей, при сохранении способности удовлетворять потребности в будущем [1]. Ключевыми целями глобального устойчивого развития являются: повышение эффективности использования ресурсов, снижение объемов выбросов, оказывающих негативное воздействие на здоровье человека и состояние окружающей среды, а также формирование систем планирования и управления, адаптированных к условиям изменяющегося климата [2].

Одной из ключевых целей устойчивого развития является разработка ресурсосберегающего и экологичного транспорта, что обусловлено значительным негативным его влиянием на окружающую среду [2]. На долю транспортной отрасли приходится существенная часть (20-25%) мирового потребления энергии и выбросов углекислого газа [3]. Практически все (97%) вредные выбросы транспорта в атмосферу обусловлены сжиганием топлива [4]. В них содержатся опасные для здоровья оксиды азота и твердые частицы [5], а также парниковые газы, такие как оксиды углерода и углеводороды [6]. При этом, темпы роста выбросов газов в транспортной отрасли опережают все остальные сектора экономики [7].

Таким образом, для устойчивого развития транспорта необходимо обеспечивать его ресурсосбережение, энергоэффективность и экологичность [8]. Например, Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года выделяет базовую задачу «Снижение негативного воздействия транспортного комплекса на окружающую среду и климат в соответствии с принципами устойчивого развития», выполнение которой влияет на достижение всех её целей [9].

Ключевым фактором достижения глобальных целей устойчивого развития является внедрение транспортными компаниями принципов устойчивого развития ESG (Environment, Social, Governance) [10]. В последние десятилетия эта концепция, основанная на ответственном отношении к окружающей среде, социальной ответственности и эффективном корпоративном управлении, получила широкое распространение. В контексте транспорта, задачи устойчивого развития заключаются в улучшении экономических и экологических показателей перевозочной деятельности, что достигается как за счет технологического прогресса, так и за счет инвестиций в обучение и развитие персонала (см., например, [11]).

Психологические аспекты устойчивого развития стали предметом изучения, начиная с работы [12]. Последующие исследования позволили сформулировать парадигму устойчивого поведения [13], которое характеризуется осознанием необходимости экономии ресурсов и сохранения окружающей среды. Такое поведение, выражающееся в бережном отношении к ресурсам и природе, приводит к удовлетворению и мотивации сотрудников [11, 13].

Например, основная часть корпоративного парка транспортных средств, как правило, оснащена двигателями внутреннего сгорания, что делает его крупнейшим потребителем топлива. Например, в РЖД львиная доля топлива (до 80%) расходуется тепловозами [14]. Сокращение потребления топлива корпоративным транспортом – это прямой путь к ресурсосбережению, снижению не только издержек, но и выбросов загрязняющих веществ, включая парниковые газы, способствующие изменению климата. Транспортные компании стремятся к этому, обучая и мотивируя сотрудников, формируя у них ответственное отношение к ресурсам (см., например, [11]). Такой подход позволяет не только экономить топливо и финансовые средства, но и значительно снизить экологический след компании, обеспечивая соответствие нормам охраны окружающей среды.

Несмотря на это, нередко можно увидеть стоящие автомобили и даже тепловозы с работающими двигателями. Часто это происходит из-за того, что в крупных компаниях лимиты на топливо для подразделений и сотрудников сокращаются, если они экономят топливо в текущем периоде. Однако, более низкие лимиты означают меньше топлива для выполнения рабочих задач. Поскольку расход топлива подвержен случайным колебаниям, подразделения и сотрудники могут в будущем столкнуться с нехваткой топлива и не выполнить задачи, что приведет к проблемам. Поэтому, менеджеры, опытные водители и машинисты могут намеренно не экономить топливо, чтобы избежать сокращения лимитов. Это классический пример проблемы адаптивного планирования, когда лимиты устанавливаются исходя из достигнутых результатов. Такого рода проблемы являются предметом изучения в теории управления организационными системами [15]. Решение таких проблем требует разработки специальных организационных механизмов управления корпорациями [16]. Например, в статье [17] рассмотрен механизм стимулирования внедрения экологических требований к локомотивам в ОАО «РЖД».

В представленной работе исследуются возможности обеспечения устойчивого развития транспортной корпорации. Основной акцент делается на разработке модели обучения и мотивации, направленной на изменение поведения руководителей и сотрудников, чтобы они стремились к сокращению потребления ресурсов (например, топлива и электроэнергии) корпоративным транспортом. Параллельно разрабатываются организационные структуры, поддерживающие эту устойчивость.

## **1. Организационное управление устойчивым развитием транспорта**

### **1.1. Принципы управления устойчивым развитием транспорта**

Теоретические и методологические основы стратегического адаптивного управления транспортом рассмотрены в [18]. В их основе лежит концепция организационного управления с помощью Прогрессивного Развивающего Организационного Комплексного Согласованного Интеллектуального Механизма с Адаптацией (кратко – концепция ПРОКСИМА). Впервые эта концепция была апробирована при разработке и внедрении адаптивных механизмов отраслевого управления [19, 20]. На базе ПРОКСИМА, были разработаны методология и методы управления эволюцией больших социально-экономических систем [21]. Фундаментальные результаты [19-21] легли в основу теории больших транспортных систем [22].

Рассмотрим принципы построения механизмов устойчивого развития транспорта (МУРТ) в рамках парадигмы стратегического адаптивного управления транспортом [18]. Поскольку МУРТ являются одним из видов механизмов стратегического адаптивного управления транспортом, их также целесообразно формировать на основе концепции ПРОКСИМА. В частности, прогрессивность МУРТ, основанного на этой концепции, предполагает раскрытие потенциала лиц, принимающих решения (ЛПР). Далее, МУРТ, как организационный механизм, является составной частью организационной системы устойчивого развития транспорта. Соответственно, МУРТ должен включать процедуры, алгоритмы и программы, позволяющие эффективно формировать целевые значения и планировать показатели устойчивого развития транспорта, соответствующие стратегическим приоритетам [9], а также выявлять и устранять их отклонения от целевых значений и планов.

Комплексность МУРТ предполагает всесторонний учет внешних факторов и воздействий при управлении транспортным комплексом. Согласованность МУРТ означает координацию действий заинтересованных лиц. Интеллектуальность МУРТ предполагает использование методов и технологий искусственного интеллекта, в том числе цифрового и машинного обучения. Адаптивность МУРТ предполагает использование возникающих возможностей для повышения устойчивости транспортного комплекса.

### **1.2. Архетипы и механизмы устойчивого развития транспорта**

Теоретически, иерархическую систему управления развитием транспорта можно рассматривать как композицию двухуровневых систем, на верхнем уровне которых находится управляющий орган (УО), а на нижнем – активный элемент транспорта (АЭТ), реализующий рабочий процесс. Рассмотрим её модель, в которой роль УО играет орган или лицо, ответственное за устойчивое развитие объекта транспорта (Хозяин), а роль АЭТ – орган или лицо, ответственное за процесс работы этого объекта в условиях помех. Для краткости, такая система называется – архетип устойчивости «Хозяин» (рис. 1). Выход рабочего процесса в периоде  $t$  характеризует показатель устойчивости  $s_t$ , причем  $s_t \in [m_t, S_t], t = 0, 1, \dots$

В начале периода  $t$  величины  $m_t$  и  $S_t$  становятся известны АЭТ. Однако  $m_t$  и  $S_t$  не известны УО при задании плана  $p_t$  и количества ресурсов  $q_t$  для АЭТ. Исходя из этого, АЭТ выбирает показатель  $s_t \in [m_t, S_t]$ . УО наблюдает  $s_t$  и, сопоставляя его с планом  $p_t$ , определяет стимул АЭТ  $i_t = I(p_t, s_t)$ .

Далее, УО определяет прогнозную оценку  $e_{t+1}$  на период  $t+1$  с помощью рекуррентной процедуры:  $e_{t+1} = E(e_t, s_t)$ ,  $e_0 = e^0$ . На основе прогноза  $e_{t+1}$ , УО определяет план  $p_{t+1}$  и ресурс  $q_{t+1}$  на период  $t+1$ :  $p_{t+1} = P(e_{t+1})$ ,  $q_{t+1} = Q(e_{t+1})$ , используя процедуры планирования  $P$  и выделения ресурсов  $Q$ . На этом функционирование системы в периоде  $t$  завершается, наступает период  $t+1$  и т.д.

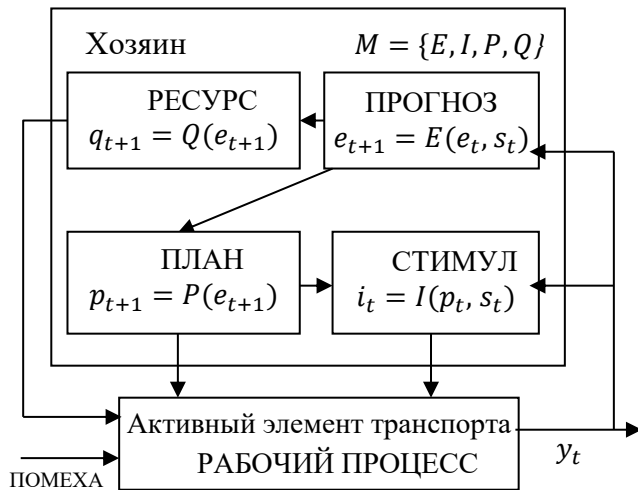


Рис. 1. Архетип устойчивости «Хозяин»

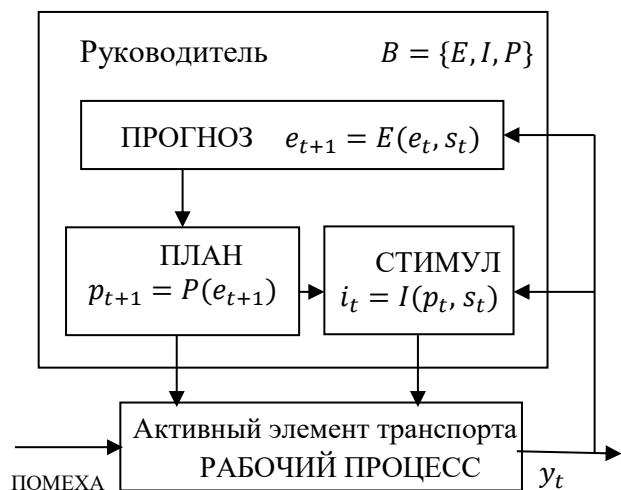


Рис. 2. Архетип устойчивости «Руководитель»

Таким образом, функционирование системы «Хозяин – АЭТ» обеспечивает совокупность процедур прогнозирования  $E$ , планирования  $P$ , выделения ресурсов  $Q$  и стимулирования  $I$ , которая называется механизмом функционирования  $M = \{E, I, P, Q\}$ . При этом АЭТ может манипулировать показателем устойчивости  $s_t$ ,  $s_t \in [m_t, S_t]$ , так, чтобы обеспечить себе большие стимулы сегодня и в перспективе. Формально, проблема синтеза МУРТ в системе «Хозяин – АЭТ» заключается в построении механизма  $M = \{E, I, P, Q\}$ , при котором АЭТ выбирает показатель  $s_t$ ,  $s_t \in [m_t, S_t]$ , в интересах системы в целом. Для теоретического решения этой проблемы используются методы, разработанные в [20-22].

Упрощая архетип «Хозяин», можно построить архетип устойчивости «Руководитель», в котором УО планирует и контролирует работу АЭТ, но не распоряжается ресурсами (рис. 2). Ещё более простой архетип устойчивости «Менеджер» получается из архетипа «Хозяин», если УО не может распоряжаться ресурсами и планировать (рис. 3).

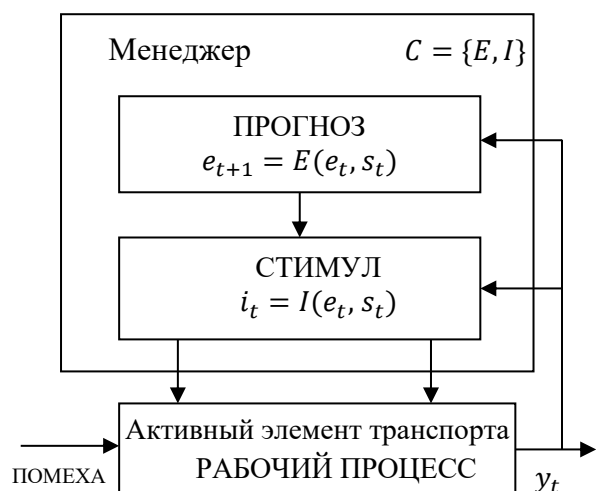


Рис. 3. Архетип устойчивости «Менеджер»

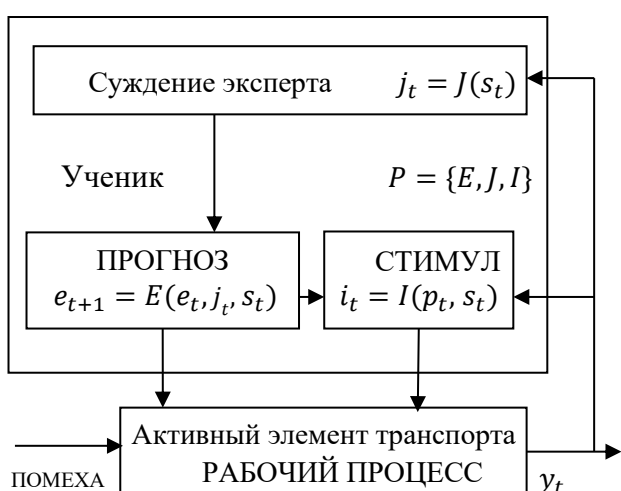


Рис. 4. Архетип устойчивости «Ученик»

Архетип устойчивости «Ученик» получается из архетипа «Хозяин», если УО не только не имеет функций выделения ресурсов  $R$  и планирования  $X$ , но и прогнозирование ( $F$ ) выполняет не самостоятельно, а с помощью суждения эксперта  $j_{t+1} = J(s_t)$  (рис. 4).

### 1.3. Прогрессивные интеллектуальные механизмы устойчивого развития транспорта

Устойчивое развитие транспорта призвана обеспечить соответствующая организационная система управления ресурсосбережением и сокращением выбросов вредных веществ в окружающую среду, включающая структуру управления и механизмы её функционирования. Комбинируя рассмотренные выше четыре архетипа с помощью приемов системотехники [23], можно строить более сложные системы управления устойчивым развитием транспорта.

Для управления такими системами требуются более сложные МУРТ. Методологический подход к их анализу и синтезу базируется, во-первых, на исследовании и разработке простейших МУРТ  $M = \{E, I, P, Q\}$ ,  $B = \{E, I, P\}$ ,  $C = \{E, I\}$ ,  $P = \{E, J, I\}$ , обеспечивающих функционирование вышеописанных четырех архетипов. Во-вторых, необходим анализ и синтез более сложного МУРТ, сформированного на базе комбинирования (комплексирования) указанных простейших МУРТ в сложной системе управления устойчивым развитием транспорта. В обоих случаях можно использовать методы, разработанные в [20-22].

Заметим, что в качестве рекуррентной процедуры прогнозирования  $e_{t+1} = E(e_t, s_t)$  можно использовать процедуры цифрового обучения и адаптации в режиме реального времени [18, 24]. С другой стороны, способность к обучению и адаптации присуща интеллекту. Поэтому можно говорить об определенной степени интеллектуальности МУРТ, если в нем используются процедуры цифрового обучения и адаптации. Такого рода интеллектуальный МУРТ (кратко – ИМУРТ) использует данные, полученные в процессе работы, для улучшения выполнения функций прогнозирования, распределения ресурсов, планирования и стимулирования АЭТ. Это позволяет ИМУРТ постоянно совершенствоваться и адаптироваться к изменяющимся условиям. Такой подход необходим, когда система управления устойчивым развитием транспорта сталкивается с непредсказуемостью и недостатком предварительной информации, что делает невозможным создание заранее запрограммированного и эффективного решения.

Сбор и обработка данных в ИМУРТ могут ограничиваться только тем объемом, который необходим для достижения поставленных целей. Тем не менее, ИМУРТ, включающие процедуры, алгоритмы и программы цифрового обучения и адаптации, могут использовать и возможности больших данных для мониторинга и корректировки деятельности транспортного комплекса.

При построении ИМУРТ необходимо учитывать возможность нежелательной деятельности АЭТ. Ведь понимание принципов его работы (в частности, процедур цифрового обучения и адаптации) позволяет АЭТ предвидеть последствия своих действий и, следовательно, манипулировать показателями в собственных интересах. Ключевым фактором успеха является то, насколько полно АЭТ использует свой потенциал (производственный, финансовый и др.) для устойчивого развития транспорта. Соответственно, прогрессивным считается ИМУРТ, который способствует максимальному раскрытию этого потенциала.

Прогрессивный ИМУРТ может обеспечить достижение стратегических целей [9] путем раскрытия внутренних резервов исполнителей, стимулирования выполнения и перевыполнения плановых заданий, а также оперативного управления на основе анализа отклонений фактических показателей от плановых. Прогрессивность ИМУРТ может обеспечиваться методами, разработанными в [18-22].

Фундаментом для работы ИМУРТ является массив количественных данных, включающий как фактические, так и плановые значения ключевых показателей, отраженных в стратегических документах развития транспортного комплекса [9]. Цифровая трансформация создает условия для повсеместного применения data-driven подхода к обеспечению устойчивости транспортного комплекса РФ. В рамках такого подхода, возможно применение теории организационного управления, включающей анализ функционирования системы и синтез управляющих воздействий ИМУРТ. Эффективное управление в условиях экономики данных требует непрерывного обучения ЛПР. Таким образом, процессы анализа, обучения и синтеза должны быть интегрированы.

Хотя машинное обучение (МО) широко используется для управления и обучения ЛПР, его применение МО при построении МУРТ не всегда эффективно. Дело в том, что сложность МО часто препятствует пониманию логики управления и разработке обратной связи. Более того, доступность МО стимулирует отказ от традиционного анализа и проектирования систем управления, что приводит к «безмодельному» подходу. В результате, возникают трудности при попытке объединить теорию управления и МО в задачах, где необходимо одновременно управлять и обучаться. Ведь

«безмодельный» подход не позволяет эффективно использовать знания, накопленные в теории управления [25].

Кроме того, ограничения МО, связанные с его зависимостью от больших данных, препятствуют его применению в задачах управления в режиме реального времени, требующих оперативного реагирования. Для решения этой проблемы необходима альтернативная методология, примером которой является подход, основанный на цифровом обучении [18, 24]. Интеграция этого подхода с инжинирингом на основе моделей [23] позволяет разрабатывать ИМУРТ с процедурами цифрового обучения и адаптации, имитирующие когнитивные процессы принятия решений при обеспечении устойчивого развития транспорта. Например, такого рода ИМУРТ использовались в комплексе моделей управления стратегическим развитием транспортной инфраструктуры Сибири, Дальнего Востока и Российской Арктики [26]. Рассмотрим пример применения этого подхода в рамках развитой методологии построения систем устойчивого развития транспорта на основе сбережения природных ресурсов и сокращения.

## 2. Пример: синтез механизма функционирования архетипа устойчивого развития «Менеджер»

Проиллюстрируем развитую выше методологию на примере оптимального синтеза механизма функционирования архетипа устойчивого развития «Менеджер», при следующих предположениях.

Менеджер в одноименном архетипе устойчивого развития (рис. 3) отвечает за минимизацию ущерба окружающей среде, возникающего в процессе работы АЭТ. Этот ущерб оценивается комплексным показателем, характеризующим как уровень потребления не возобновляемых природных ресурсов (например, ископаемых углеводородов), так и уровень загрязнения окружающей среды в процессе работы АЭТ. Например, такого рода комплексный показатель разработан для характеристики экологичности локомотивов ОАО «РЖД» в процессе их эксплуатации [17].

Поскольку рабочий процесс реализуется в условиях помех, менеджеру неизвестны минимально возможные уровни потребления ресурсов и загрязнения окружающей среды. Соответственно, менеджер не знает минимально возможное значение комплексного показателя ущерба окружающей среде, и вынужден полагаться на информацию, предоставляемую АЭТ.

В начале каждого периода АЭТ узнает минимально возможные уровни потребления ресурсов и загрязнения. Пользуясь этим преимуществом, он может манипулировать ресурсами и загрязнением, чтобы получить больше стимулов в этом периоде. Со своей стороны, менеджер стремится мотивировать менеджера минимизировать ущерб окружающей среде с помощью ранжирования и поощрения. С этой целью, основываясь на фактическом показателе ущерба окружающей среде, менеджер присваивает АЭТ один из двух рангов: первый (приемлемый уровень потребления ресурсов и загрязнения) или второй (неприемлемый). При этом АЭТ поощряется только за первый ранг. Чтобы эта система была справедливой и эффективной в условиях неопределенности, менеджер самообучается.

### 2.1. Самообучение менеджера

В соответствии с вышесказанным, выход рабочего процесса в архетипе устойчивого развития «Менеджер» в периоде  $t$  характеризует комплексный показатель ущерба окружающей среде (кратко – показатель устойчивости  $s_t$ , причем  $s_t, s_t \in [m_t, S_t], t = 0, 1, \dots$ . Его минимальное значение  $m_t$  является случайной величиной,  $m_t \in W$ .

Предположим вначале, что менеджеру известны реализации случайной величины  $m_t, t = 0, 1, \dots$ . Тогда, чтобы ранжировать АЭТ, менеджеру необходимо отнести  $m_t$  к подмножеству  $W_1$  или  $W_2$ , в совокупности образующих множество  $W: W_1 \cup W_2 = W$ . Если  $m_t$  принадлежит подмножеству  $W_1$ , то АЭТ получает первый ранг, в противном случае – второй.

Ошибочное ранжирование приводит к потерям. Чтобы определить разбиение  $W_1$  и  $W_2$ , минимизирующее средние потери ранжирования, можно воспользоваться подходом, развитым в [24]. Следуя [24], для каждого неизвестного подмножества  $W_1$  и  $W_2$ , введем две функции потерь:

1.  $m_t - a\beta$  – потери в случае, если менеджер считает, что  $m_t \in W_1$ , и присваивает АЭТ первый ранг (т.е. менеджер считает ущерб окружающей среде приемлемым), в то время как на самом деле ущерб неприемлем:  $m_t \in W_2, 0 < \beta < 1$ .
2.  $\delta(a - m_t)$  – потери в случае, если менеджер считает, что  $m_t \in W_2$ , и присваивает АЭТ второй ранг (т.е. менеджер считает ущерб неприемлемым), в то время как  $m_t \in W_1$  (т.е. ущерб приемлем),  $\delta > 0$ .

Здесь  $a$  – неизвестный параметр, оценка которого  $a_{t+1}$  в периоде  $t + 1$  определяется из рекуррентного уравнения [24]:

$$a_{t+1} = E(a_t, m_t) = \begin{cases} a_t + \gamma_t \beta & \text{если } m_t \leq b_t \\ a_t - \gamma_t g & \text{если } m_t > b_t \end{cases}, a_0 = a^0, b_t = a_t(\beta + \delta)/(\delta + 1), \sum_{\tau=1}^{\infty} \gamma_{\tau} < \infty. \quad (1)$$

Предположим теперь, что конкретное значение  $m_t$  становится известно АЭТ в начале периода  $t$ . Менеджеру же оно не известно. Он знает только показатель  $s_t$ . Пользуясь этим, АЭТ может манипулировать показателем  $s_t$ ,  $s_t \in [m_t, S_t], m_t \in W, t = 0, 1, \dots$  Тогда, для получения оценки  $e_{t+1}$  величины  $a_{t+1}$ , он может использовать формулу (1), в которой неизвестное  $m_t$  заменено на известное  $s_t$ :

$$e_{t+1} = E(e_t, s_t) = \begin{cases} e_t + \gamma_t \beta & \text{если } s_t \leq n_t \\ e_t - \gamma_t \delta & \text{если } s_t > n_t \end{cases}, e_0 = a^0, n_t = e_t(\beta + \delta)/(\delta + 1). \quad (2)$$

Процедура (2) является частным случаем рекуррентной процедуры прогнозирования  $e_{t+1} = E(e_t, s_t)$  (рис. 3), которая основана на цифровом самообучении менеджера. С её помощью, менеджер определяет ранг АЭТ:

$$r_t = R(n_t, s_t) = \begin{cases} 1 & \text{если } s_t \leq n_t \\ 2 & \text{если } s_t > n_t \end{cases}. \quad (3)$$

Предполагается, что АЭТ поощряется за присвоение первого ранга. Поэтому процедура (3) может рассматриваться как частный случай процедуры стимулирования  $i_t = I(e_t, s_t)$  (рис. 3), которая основана на ранжировании. По сути,  $n_t$  – это норматив комплексного показателя ущерба (потребления природных ресурсов и загрязнения), используемый менеджером для определения ранга АЭТ: при  $s_t \leq n_t$  АЭТ получает первый ранг, в противном случае – второй. Процедура самообучения (2) и процедура ранжирования (3) образуют ИМУРТ  $K = (E, R)$ .

## 2.2. Решения активного элемента транспорта

Предположим, что АЭТ стремится повысить собственную полезность, которая зависит от текущих и будущих рангов потребления ресурсов и загрязнения окружающей среды:

$$V_t = V[r_t, r_{t+1}, \dots, r_{t+\varepsilon}], V_t \downarrow r_{\zeta}, \zeta = \overline{t, t + \varepsilon}. \quad (4)$$

Здесь  $V[r_t, r_{t+1}, \dots, r_{t+\omega}]$  – невозрастающая функция текущего и будущих рангов,  $\varepsilon$  – дальновидность АЭТ.

Чтобы увеличить полезность (4), АЭТ должен в периоде  $t$  выбрать показатель  $s_t$ ,  $s_t \in [m_t, S_t], t = 0, 1, \dots$  При этом АЭТ неизвестны будущие показатели  $s_{\eta}$ ,  $\eta = t + 1, t + \theta$ . Известно лишь, что  $s_{\eta} \in [m_{\eta}, S_{\eta}], m_{\eta} \in W$ . При устранении такой неопределенности, АЭТ руководствуется принципом максимального гарантированного результата [15]. В этом случае АЭТ исходит, во-первых, из того, что, какова бы ни была реализация  $m_{\eta}$ , он (АЭТ) выберет показатель  $s_{\eta}$ , наилучший в сложившейся ситуации, при условии  $s_{\eta} \in [m_{\eta}, S_{\eta}]$ . Во-вторых, АЭТ рассчитывает на наихудшие значения  $m_{\eta}$ , при условии  $m_{\eta} \in W$ . Тогда целевая функция АЭТ  $G_t(s_t)$  в периоде  $t$ , в зависимости от показателя  $s_t$ , определяется как минимальное гарантированное значение полезности (4):

$$G_t(s_t) = \min_{\eta=t+1, t+\varepsilon} \min_{m_{\eta} \in W} \max_{s_{\eta} \in [m_{\eta}, S_{\eta}]} U_t \xrightarrow{s_t \in [m_t, S_t]} \max. \quad (5)$$

Соответственно, АЭТ выбирает  $s_t$  так, чтобы максимизировать целевую функцию (5). Следовательно, множество выборов АЭТ имеет вид:

$$Argmax_{s_t \in [m_t, S_t]} G_t(s_t) = \{s_t^* | G_t(s_t^*) \geq G_t(s_t), s_t \in [m_t, S_t], m_t \in W\}. \quad (6)$$

## 2.3. Минимизация потребления природных ресурсов и загрязнения окружающей среды

**Утверждение.** Предположим, что АЭТ благожелателен к менеджеру: если  $m_t \in Argmax_{s_t \in [m_t, S_t]} G_t(s_t)$ ,

то АЭТ выбирает  $s_t^* = m_t, t = 0, 1, \dots$  Тогда, при использовании ИМУРТ  $K = (E, R)$ , комплексный показатель потребления ресурсов и загрязнения окружающей среды в каждом периоде минимален:  $s_t^* = m_t, t = 0, 1, \dots$

*Доказательство.* ИМУРТ  $K = (E, R)$  включает процедуры (2) и (3). Согласно (3), ранг  $r_t = R(n_t, s_t)$  не уменьшается с ростом  $s_t$ . Далее, рассматривая (2) как рекуррентное соотношение, нетрудно

показать, что  $n_\eta$  не увеличивается с уменьшением  $s_t$ ,  $\varphi = \overline{t+1, t+\theta}$ . Кроме того, согласно (3),  $r_\eta = R(n_\eta, s_\eta)$  не растёт с ростом  $n_\eta$ . Таким образом,  $r_\eta$  не снижается с ростом  $s_t$ ,  $\eta = \overline{t+1, t+\theta}$ .

Следовательно, согласно (4),  $V_t$  не растёт с ростом  $s_t$ . Но тогда, согласно (5), и  $G_t(s_t)$  не растёт с ростом  $s_t$ . Следовательно,  $G_t(s_t)$  достигает максимума при  $s_t = m_t$ . Но, по условию Утверждения, АЭТ благожелателен по отношению к менеджеру. Учитывая (6), при  $m_t \in \underset{s_t \in [m_t, S_t]}{\text{Argmax}} G_t(s_t)$ , АЭТ выбирает

$$s_t^* = m_t, t = 0, 1, \dots \text{ ч.т.д.}$$

Содержательно, использование ИМУРТ  $K = (E, R)$  минимизирует ущерб, возникающий в результате потребления не возобновляемых природных ресурсов (например, ископаемых углеводородов) и загрязнения окружающей среды в процессе работы двухуровневой транспортной системы, представленной на рис. 3.

### 3. Заключение

Императив устойчивого развития транспорта – экономия потребляемых природных ресурсов и снижение выбросов вредных веществ в окружающую среду. Для устойчивого развития крупномасштабных транспортных систем нужно создавать соответствующие организационные механизмы, включающие процедуры прогнозирования, планирования, распределения ресурсов и стимулирования.

Основные принципы построения организационных механизмов устойчивого развития транспорта – прогрессивность, комплексность, согласованность, интеллектуальность и адаптивность. Такие механизмы можно формировать путем комплексирования (комбинирования) простейших механизмов функционирования двухуровневых организационных систем – архетипов устойчивого развития транспорта, включающих процедуры цифрового обучения и адаптации.

Разработанная методология построения систем и механизмов устойчивого развития транспорта на основе сбережения природных ресурсов и сокращения выбросов вредных веществ в окружающую среду основана на теории организационного управления большими транспортными системами. Применение этой методологии позволяет научно обоснованно реализовывать на практике парадигму устойчивого развития транспорта. Полученные результаты позволяют определить и сформулировать научно обоснованные требования к составу, структуре, функциональным возможностям и характеристикам компонентов, обеспечивающих устойчивость транспортных систем.

Разработанная методология была применена при формировании концепции требований к локомотивам ОАО «РЖД» в области охраны окружающей среды. В перспективе, предполагается расширить область применения этой методологии на автомобильный и водный транспорт.

Перспективными направлениями дальнейших исследований в этой области являются:

- разработка механизмов устойчивого развития транспортных корпораций с более сложными процедурами цифрового обучения и адаптации;
- обобщение полученных результатов для решения более широкого спектра задач, связанных с устойчивым развитием.

### Литература

1. Наше общее будущее: доклад международной комиссии по окружающей среде и развитию. – Пер. с англ. под ред. С.А. Евтеева, Р.А. Перелета – М.: Прогресс, 1989. – 248 с.
2. Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development / United Nations General Assembly Resolution A/RES/70/1. – New York: United Nations, 2015. – 35 p.
3. Caille A., Al-Moneef M., Castro F.B. et al. Transport technologies and policy scenarios to 2050. – London: World Energy Council, 2007. – 140 p.
4. About transportation & climate change: transportation's role in climate change. – Washington: US Department of Transportation, 2015. <https://web.archive.org/web/20151031215015/http://climate.dot.gov/about/transportations-role/overview.html> (дата обращения 07.05.2025).
5. Kim M.-K., Park D., Kim D.Y. Quantification of the ecological value of railroad development areas using logistic regression analysis // Intern. J. of Environmental Research and Public Health. – 2021. – Vol. 18, N. 22. – P. 11764.
6. Iliev S., Stanchev H., Mitev E. An experimental comparison of emissions of a common-rail diesel engine fueled with ethanol and butanol additives // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2868. – P. 020018.
7. Metz B., Davidson O.R., Bosch R. et al. Transport and its infrastructure // In: Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. – New York, 2007. – P. 323–386.
8. Савосина М.И. Оценка эффективности устойчивого развития транспорта // Мир транспорта. 2020. N 2. – С. 50–66.

9. Транспортная стратегия РФ до 2030 г. с прогнозом на период до 2035 г. // URL: <https://mintrans.gov.ru/ministry/targets/187/191/documents> (дата обращения 19.04.2025).
10. *Pollman E.* The making and meaning of ESG // *Harvard Bus. L. Review.* – 2024. – Vol.14. – P.403.
11. Union Pacific: Sustainability. <https://www.up.com/aboutup/esg/index.htm> (дата обращения 07.05.2025).
12. *Corral-Verdugo V., Frias M., Garcia C.* Introduction to the psychological dimensions of sustainability // In: V. Corral, C. Garcia, M. Frias (eds.), *Psychological Approaches to Sustainability.* — New York: Nova Publ., 2010. – P. 3–18.
13. *Tapia-Fonllem C., Corral-Verdugo V., Fraijo-Sing.* Sustainable behavior and quality of life // In: Fleury-Bahi G., Pol E., Navarro O. (eds), *Handbook of Environmental Psychology and Quality of Life Research.* – Cham: Springer, 2017. – P. 265–268.
14. *Бурков В.Н.* Модели и методы управления разработкой и внедрением инновационных энергоэффективных средств и технологий в ОАО «РЖД» / В.Н. Бурков, А.К. Еналеев, Д.Н. Федянин и др. – М.: ИПУ РАН, 2018. – 148 с.
15. *Новиков Д.А.* Теория управления организационными системами. – 2-е изд. – М.: Физматлит, 2007. – 584 с.
16. *Burkov, V., Kondratiev, V., Korgin, N., Novikov, D.* Mechanism design and management. Mathematical methods for smart organizations. – New York: NOVA Publ., 2013. – 187 p.
17. *Enaleev A.* Comprehensive assessment and incentive mechanism to implement environmental requirements for locomotives 6th // *Proc. of the 6-th Intern. Conf. on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency.* – Lipetsk, 2024. – P. 804–809.
18. *Цыганов В.В.* Стратегическое адаптивное управление транспортом // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2024): труды Семнадцатой междунар. конф: в 2 т. – М.: ИПУ РАН, 2024. – Т. 1. – С.52–62.
19. *Бурков В.Н.* Теория активных систем и совершенствование хозяйственного механизма / В.Н. Бурков, В.В. Кондратьев, А.М. Черкашин и др. – М.: Наука, 1984. – 271 с.
20. *Цыганов В.В.* Адаптивные механизмы в отраслевом управлении. – М.: Наука, 1991. – 166 с.
21. *Цыганов В.В.* Интеллектуальное предприятие. Теория и практика управления эволюцией организации / В.В. Цыганов, В.А. Бородин, Г.Б. Шишкин – М.: Университетская книга, 2004. – 770 с.
22. *Цыганов В.В.* Большие транспортные системы: теория, методология, разработка и экспертиза / В.В. Цыганов, И.Г. Малыгин, А.К. Еналеев и др. – СПб.: ИПТ РАН, 2016. – 216 с.
23. *Косяков А.* Системная инженерия. Принципы и практика / А. Косяков, У. Свит, С. Сеймур и др. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 624 с.
24. *Цыганов В.В.* Самообучение классификации затрат транспортного комплекса // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2024): труды Семнадцатой междунар. конф: в 2 т. – М.: ИПУ РАН, 2024. – Т. 2. – С. 782–789.
25. *Recht B.* Reflections on learning-to-control renaissance // *IFAC PapersOnLine.* – 2020. – Vol. 53, N 1. – P. 275–280.
26. *Малыгин И.Г.* Комплекс моделей стратегического управления транспортной инфраструктурой Сибири, Дальнего Востока и Российской Арктики / И.Г. Малыгин, А.К. Еналеев, С.А. Савушкин и др. – СПб.: СПбГУ ГПС МЧС России, ИПТ РАН, 2023. – 122 с.