

# МЕХАНИЗМ КОНТРОЛЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В ТРАНСПОРТНОМ ХОЛДИНГЕ

Цыганов В.В.

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

*Аннотация. Разработан механизм контроля загрязнения окружающей среды в транспортном холдинге, подвергающемся случайным внешним воздействиям, с учетом несовпадения целей составляющих его компаний и их сотрудников. Во избежание манипулирования данными, используется двухуровневое цифровое обучение руководителей холдинга и компаний, а также процедуры стимулирования сотрудников.*

*Ключевые слова: транспорт, холдинг, компания, загрязнение окружающей среды, управление, обучение.*

## Введение

Экологическая безопасность России в значительной степени зависит от загрязнения окружающей среды транспортным комплексом [1]. Внутренний контроль экологической безопасности в крупномасштабных транспортных корпорациях (таких, как холдинг «РЖД») ведут топ-менеджеры, руководители дочерних компаний и их подразделений [2]. Им помогают специалисты по охране окружающей среды – инженеры-экологи, аналитики экологической безопасности и рисков, разработчики экологической документации. Внешний контроль транспортного холдинга в сфере экологической безопасности осуществляют эксперты и инспекторы государственного экологического надзора.

Для повышения экологической безопасности холдинга, необходимо разрабатывать и внедрять внутренние механизмы снижения негативного воздействия транспортной деятельности на окружающую среду. Практика показывает, что они опираются на внедрение технологий обработки данных в проектах цифровой трансформации транспортной деятельности [3]. Важное место в них занимают инструменты искусственного интеллекта, такие как машинное обучение [4]. При этом необходимо учитывать, что экологическую безопасность холдинга обеспечивают иерархические структуры, элементы которых обычно недостаточно знают возможности друг друга [5].

Проблемы управления такого рода иерархическими структурами, на верхних уровнях которых находятся менеджеры, а на нижних – активные элементы, рассматриваются в теории организационного управления [6]. При этом предполагается, что активные элементы лучше знают свои возможности. Поэтому они могут проявлять нежелательную активность (например, манипулировать показателями загрязнения) ради собственной выгоды.

Чтобы избежать такой нежелательной активности, менеджерам следует мотивировать активные элементы раскрывать свои возможности даже в условиях неопределенности, например, при случайных внешних воздействиях и помехах. Для этого менеджеры формируют наборы правил принятия решений – механизмы функционирования, включающие процедуры прогнозирования, планирования и стимулирования. Тем не менее, активные элементы могут манипулировать своими показателями таким образом, чтобы получать наиболее выгодные планы и стимулы с помощью этих механизмов функционирования [7].

К сожалению, внедрению оптимальных решений такого рода проблем в практику препятствует разрыв между теорией управления и машинным обучением [8]. Для его преодоления разрабатываются процедуры цифрового обучения в реальном времени [9]. При этом исследуются игры менеджеров и активных элементов, обусловленные их асимметричной информированностью [10]. Например, в [11] исследовалась игра самообучающегося менеджера с активным элементом, который манипулирует затратами так, чтобы увеличить собственную целевую функцию. Чтобы избежать такой нежелательной активности, разработан механизм, мотивирующий этот элемент к экономии даже при случайных помехах. Для решения проблем управления такого рода в более сложных организационных структурах используются комбинирование организационных механизмов с помощью системной инженерии [12].

В данной статье разрабатывается механизм снижения загрязнений, производимых транспортным холдингом, на основе экологических норм и контроля их выполнения. Эти нормы формируются с помощью процедур цифрового обучения менеджеров. Для того чтобы мотивировать активный элемент на снижение загрязнений при случайных помехах, вышестоящий менеджер присваивает нижестоящему одну из двух категорий, от которых зависят стимулы последнего.

## 1. Модель организации контроля загрязнения в транспортном холдинге

Рассмотрим модель контроля загрязнения окружающей среды в холдинге, включающем транспортные компании, при случайных внешних воздействиях. Ответственный топ-менеджер холдинга (Куратор) контролирует загрязнения, связанные с транспортной деятельностью этих компаний. Для простоты будем считать, что эта деятельность и связанные с нею загрязнения в каждой компании производятся независимо. В этом случае, без потери общности, достаточно исследовать управление Куратором одной компанией, которую возглавляет Директор. Этой компании принадлежит объект транспорта (например, транспортный сервис или транспортное средство), загрязняющий окружающую среду. Этим объектом управляет Работник. Транспортную деятельность в компании можно также осуществлять по аутсорсингу.

Рассмотрим базовые предположения об информированности, возможностях и действиях вышеуказанных сотрудников холдинга в связи с загрязнениями окружающей среды. Поскольку эти загрязнения зависят от случайных факторов, Куратор не знает минимально возможных уровней загрязнений. В этих условиях, ему приходится основываться только на информации, получаемой от Директора.

Директор может уменьшить загрязнение, производимое компанией. Но, как активный элемент, он может использовать неосведомленность Куратора, чтобы получить больше стимулов, манипулируя этим загрязнением. Со своей стороны, Куратор стремится мотивировать Директора минимизировать загрязнение компании. Для этого Куратор обучается с помощью Эксперта.

Директор же знает минимальное загрязнение от перевозок по аутсорсингу, но не знает случайный минимальный уровень загрязнения, производимого транспортным объектом. Работник узнает этот уровень, и поэтому может манипулировать загрязнением, чтобы получить больше стимулов. Директор должен учитывать это, чтобы мотивировать Работника снизить загрязнения.

## 2. Механизм контроля загрязнения компаний

### 2.1. Обучение Куратора Экспертом

Обозначим  $t$  номер периода времени, а  $p_t$  – загрязнение, производимое компанией в периоде  $t$ ,  $t = 0, 1, \dots$  Куратор и Эксперт узнают  $p_t$  от Директора компании. Минимально возможное загрязнение компании равно  $P_t$ , поэтому  $p_t \in P_t = [P_t, \alpha]$ . Предполагается, что  $P_t$  – стационарная случайная величина, причем  $P_t \subset P = [\beta, \alpha], \beta \geq 0$ . Значение  $P_t$  становится известно Директору в периоде  $t$ . Поскольку Куратор и Эксперт не знают  $P_t$ , то Директор может выбрать  $p_t$ ,  $p_t \in P_t$ . Чтобы уменьшить загрязнение, Куратор использует индикатор загрязнения:

$$I_t = P_t/\alpha, I_t \in [\beta/\alpha, 1], i_t = p_t/\alpha, i_t \in I_t = [I_t, 1], t = 0, 1, \dots \quad (1)$$

Рассмотрим вначале случай, когда величина  $I_t$  Куратору известна. Будем предполагать, что Куратор мотивирует Директора к снижению загрязнения, основываясь на ранжировании в зависимости от индикатора загрязнения  $I_t$ . Именно, при умеренном загрязнении, не превышающем некоторую норму экологичности, Куратор присваивает ранг 1 Директору, и последний поощряется. Если же загрязнение чрезмерно, то Директору присваивается ранг 0, и он наказывается. Чтобы обосновать такое ранжирование, Куратор обучается, используя мнение Эксперта о том, является ли загрязнение чрезмерным.

Формально, если Эксперт считает загрязнение в периоде  $t$  чрезмерным, то его мнение  $m(I_t) = 1$ , иначе  $m(I_t) = 0$ , так что

$$m(I_t) = \begin{cases} 1 & \text{если } I_t > p \\ 0 & \text{если } I_t \leq p \end{cases}, t = 0, 1, \dots, \quad (2)$$

где  $p$  – параметр меры загрязнения. Эксперт сообщает мнение (2) Куратору для ранжирования. Поскольку  $I_t$  – стационарная случайная величина, то ранжирование должно минимизировать средние потери. Для этого можно использовать подход, развитый в [9]. Именно, обозначим:

$l_{10}$  – потери из-за ошибочного присвоения Директору ранга 0 (хотя он заслуживает ранга 1);

$l_{01}$  – потери из-за ошибочного присвоения Директору ранга 1 (хотя он заслуживает ранга 0).

Тогда оценка параметра  $p$  в периоде  $t + 1$  вычисляется с помощью алгоритма обучения [9]:

$$p_{t+1} = D(p_t, I_t) = p_t - \delta_t [p_t - 0,5 - l_{01} - (l_{01} + l_{10})m(I_t)], p_0 = p^0, \delta_{t+1} < \delta_t, \sum_{\tau=0}^{\infty} \delta_{\tau} < \infty. \quad (3)$$

Рассмотрим теперь случай, когда Куратор и Эксперт не знают  $I_t$ , и основывают свои решения на известном  $i_t$ . Тогда мнение Эксперта определяется по формуле (2), в которой неизвестное  $I_t$  заменяется на известное  $i_t$ :

$$m(i_t) = \begin{cases} 1 & \text{если } i_t > p \\ 0 & \text{если } i_t \leq p \end{cases}, \quad t = 0, 1, \dots \quad (4)$$

Аналогичным образом, Куратор для оценки параметра  $p$  использует формулу (3), в которой неизвестное  $I_t$  заменяется на известное  $i_t$ . Тогда оценка  $d_{t+1}$  параметра  $p$  в периоде  $t + 1$  вычисляется из рекуррентного соотношения

$$d_{t+1} = D(d_t, i_t) = d_t - \delta_t [p_t - 0,5 - l_{01} - (l_{01} + l_{10})m(i_t)], \quad d_0 = p^0, \quad t = 0, 1, \dots \quad (5)$$

При это Куратор определяет ранг Директора  $r_t$  с помощью процедуры ранжирования:

$$r_t = R(d_t, i_t) = \begin{cases} 1 & \text{если } i_t \leq d_t \\ 0 & \text{если } i_t > d_t \end{cases}, \quad t = 0, 1, \dots \quad (6)$$

По сути,  $D(d_t, i_t)$  – это процедура нормирования индикатора  $i_t$ . Процедуры нормирования (5) и ранжирования (6) составляют механизм контроля загрязнения компанией окружающей среды  $M = (D, R)$ .

## 2.2. Решения Директора

Предположим, что полезность ранжирования для дальновидного Директора в периоде  $t$  растет с текущими и будущими рангами:

$$\Pi_t = \Pi[r_t, r_{t+1}, \dots, r_{t+\varepsilon}], \quad B_\tau \uparrow r_\tau, \tau = \overline{t, t+\varepsilon}, \quad t = 0, 1, \dots, \quad (7)$$

где  $\Pi[r_t, r_{t+1}, \dots, r_{t+\varepsilon}]$  – неубывающая функция  $r_\tau$ ,  $\varepsilon$  – число будущих периодов, учитываемых Директором. Чтобы увеличить полезность (7), Директор должен в периоде  $t$  выбрать загрязнение  $p_t$ ,  $p_t \in P_t$ . При этом Директору неизвестны будущие загрязнения  $p_\phi$ ,  $\phi = \overline{t+1, t+\varepsilon}$ . Известно лишь, что  $p_\phi \in P_\phi$  и  $P_\phi \subset P$ . При устранении такой неопределенности, Директор руководствуется принципом максимального гарантированного результата [6]. В этом случае Директор исходит, во-первых, из того, что, какова бы ни была реализация  $P_\phi$ , он будет выбирать  $p_\phi$ , наилучшее в сложившейся ситуации, при условии  $p_\phi \leq P_\phi$ . Во-вторых, Директор рассчитывает на наихудшие значения  $P_\phi$ , при условии  $P_\phi \subset P$ . Тогда целевая функция Директора  $\Phi_t(i_t)$  в периоде  $t$ , в зависимости от индикатора загрязнения  $i_t$ , определяется как минимальное гарантированное значение полезности (7):

$$\Phi_t(i_t) = \min_{\phi=\overline{t+1, t+\varepsilon}} \min_{P_\phi \in P} \max_{p_\phi \in P_\phi} \Pi_t \xrightarrow{i_t \in I_t} \max, \quad t = 0, 1, \dots \quad (8)$$

Директор выбирает загрязнение  $p_t$  так, чтобы увеличить целевую функцию (8). Тогда оптимальный индикатор загрязнения определяется из условия  $i_t^* = \underset{i_t \in I_t}{\operatorname{argmax}} \Phi_t(i_t)$ . Множество таких индикаторов зависит от механизма  $M = (D, R)$ , и имеет вид

$$E_t(M) = \{i_t^* | \Phi_t(i_t^*) \geq \Phi_t(i_t), i_t \in I_t\}, \quad t = 0, 1, \dots \quad (9)$$

Далее мы принимаем гипотезу о благожелательности Директора к Куратору: если  $I_t \in E_t(M)$ , то Директор выбирает  $i_t^* = I_t$ . При этом, согласно (1), загрязнение  $p_t^* = \alpha I_t^* = \alpha I_t = P_t, t = 0, 1, \dots$

## 2.3. Минимизация загрязнения компанией

Цель Куратора – снизить загрязнение  $p_t^*$  до минимума  $P_t$ . Соответственно, индикатор загрязнения  $i_t^*$  должен снизиться до минимума  $I_t$ . Согласно (6), ранг Директора не снижается, когда  $i_t$  уменьшается до нормы  $d_t$ . Это мотивирует недальновидного Директора, благожелательного к Куратору, снизить загрязнение в периоде  $t$ .

Однако дальновидный Директор должен учитывать последствия текущих решений. Ведь на практике будущая норма загрязнения в корпорациях часто снижается, при снижении текущего загрязнения. Формально это означает, что норма  $d_{t+1}$  снижается при уменьшении  $i_t$ . Но тогда, согласно (6), чем ниже норма  $d_{t+1}$ , тем ниже должен быть индикатор загрязнения  $i_{t+1}$  в периоде  $t + 1$  для получения ранга 1 и поощрения. Однако точно предсказать будущую случайную реализацию минимально возможного загрязнения  $p_{t+1}$  Директор не может. Соответственно, он не может предсказать  $I_{t+1}$ . Поэтому, учитывая, что  $i_{t+1} \geq I_{t+1}$ , Директор не уверен, что сможет обеспечить

выполнение условия  $i_{t+1} \leq d_{t+1}$  для получения ранга 1 и поощрения. Таким образом, дальновидный Директор может не быть мотивирован снижать  $p_t^*$ . Это типичная проблема для адаптивного планирования от достигнутого уровня [7].

**Утверждение 1.** Для минимизации загрязнения окружающей среды компанией:  $p_t^* = P_t, t = 0, 1, \dots$ , достаточно использовать механизм  $M = (D, R)$ .

*Доказательство.* Рассмотрим зависимость будущего ранга  $r_\phi = R(d_\phi, i_\phi), \phi = \overline{t+1, t+\varepsilon}$ , от  $i_t$  при механизме  $M = (D, R)$ . Используя (5) как рекуррентное соотношение, нетрудно показать, что норма  $d_\phi$  является убывающей функцией  $m(i_t)$ . Но, согласно (4),  $m(i_t)$  является неубывающей функцией  $i_t$ . Поэтому норма  $d_\phi$  не понижается при снижении  $i_t$ . Далее, согласно (6), ранг  $r_\phi = R(d_\phi, i_\phi)$  не снижается при снижении  $d_\phi$ . Следовательно, ранг  $r_\phi = R(d_\phi, i_\phi)$  в периоде  $\phi$  не уменьшается при уменьшении  $i_t$ , при  $\phi = \overline{t+1, t+\varepsilon}$ . Кроме того, согласно (6), текущий ранг  $r_t = R(d_t, i_t)$  также не понижается при снижении  $i_t$ .

Но, согласно (7), целевая функция Директора (8) растет при увеличении текущего и будущих рангов  $r_t, \tau = \overline{t, t+\varepsilon}$ . Таким образом, из (7) и (8) получаем, что целевая функция  $\Phi_t(i_t)$  не уменьшается при уменьшении  $i_t$ . С учетом  $i_t \geq I_t$ , получаем  $\Phi_t(I_t) \geq \Phi_t(i_t)$ . Тогда, согласно (9),  $I_t \in E_t(M)$ , и, при благожелательности Директора к Куратору,  $i_t^* = I_t$ . Таким образом, согласно (1),  $p_t^* = \alpha i_t^* = \alpha I_t = P_t, t = 0, 1, \dots$ , ч.т.д.

### 3. Механизм контроля загрязнения транспортным объектом

#### 3.1. Активность Работника и задача Директора

Предположим теперь, что Директор отвечает перед Куратором за загрязнения от транспортного объекта и от перевозок по аутсорсингу, организуемых компанией. Обозначим случайную минимальную величину загрязнения, производимого транспортным объектом в периоде  $t$ , через  $V_t, V_t \in B = [\psi, \mu], t = 0, 1, \dots$  Кроме того, обозначим случайную минимальную величину загрязнения от перевозок по аутсорсингу через  $A_t, A_t \in A = [\pi, \rho]$ .

Рассмотрим следующий порядок функционирования компании в периоде  $t, t = 0, 1, \dots$  В начале этого периода, Директор узнает минимальное загрязнение от аутсорсинга  $A_t$ . Одновременно Работник узнает минимальное загрязнение транспортным объектом  $V_t$ , о котором Директору известно только то, что  $V_t \in B = [\psi, \mu]$ . Такая неосведомленность Директора позволяет Работнику манипулировать фактическим загрязнением  $v_t$ , которое также становится известным Директору в начале периода  $t$ , причем  $v_t \in V_t = [V_t, \mu]$ . Таким образом, в начале периода  $t$  Директору известны  $A_t$  и  $v_t$ .

Куратор заинтересован в снижении загрязнений от транспортного объекта и от перевозок по аутсорсингу. Но ни Куратор, ни Эксперт не знают ни минимального загрязнения от транспортного объекта  $V_t$ , ни минимального загрязнения от перевозок по аутсорсингу  $A_t$ . Директору же известны значения  $v_t$  и  $A_t$ . Это позволяет ему манипулировать передаваемой Куратору и Эксперту информацией о загрязнении, производимом транспортным объектом ( $y_t$ ) и перевозками по аутсорсингу ( $a_t$ ),  $y_t \in Y_t = [v_t, \mu], a_t \in A_t = [A_t, \rho]$ . В результате, Куратор и Эксперт узнают, что производимое компанией загрязнение  $x_t = a_t + y_t$ . При этом минимальное загрязнение, о котором Директор может сообщить Куратору и Эксперту, равно  $v_t + A_t$ . Поэтому  $x_t \geq v_t + A_t, t = 0, 1, \dots$

Учитывая, что  $v_t \geq V_t$ , минимум минимуму производимого компанией загрязнения равен  $X_t \equiv V_t + A_t$ . Поэтому  $x_t \geq X_t, t = 0, 1, \dots$  Куратору нужно, чтобы  $x_t = X_t$ . С другой стороны, согласно Утверждению 1, механизм контроля загрязнения компанией  $M = (D, R)$  заинтересовывает Директора в снижении загрязнения в каждом периоде:  $x_t = X_t, t = 0, 1, \dots$  При этом Директору, благожелательному к Куратору, проще выполнить условие  $a_t = A_t$ , так как он знает  $A_t$ . Но Директор не знает случайного минимального загрязнения  $V_t$ , производимого транспортным объектом. Поэтому его задача – мотивировать Работника минимизировать это загрязнение, чтобы выполнялось  $v_t = V_t, t = 0, 1, \dots$

#### 3.2. Самообучение Директора классификации Работника

Предположим, что Директор может назначать Работнику поощрение за снижение загрязнения. А чтобы поощрение было обоснованным в условиях неопределенности, Директор самообучается. При этом поощрение увязано с классом, который Директор присуждает Работнику на основе данных о загрязнении, производимом транспортным объектом. А именно, Директор присваивает Работнику первый класс, если загрязнение приемлемо, и второй класс, если оно неприемлемо. При этом Работник поощряется только за первый класс.

Сначала рассмотрим случай, когда Работнику известно минимальное загрязнение  $V_t$ , производимое транспортным объектом. Чтобы определить класс Работника в периоде  $t$ , Директору необходимо присвоить  $V_t$  одному из двух подмножеств  $B_1$  и  $B_2$ , которые составляют множество  $B, B_1 \cup B_2 = B$ . Если  $V_t$  принадлежит подмножеству  $B_1$ , то Работнику присваивается первый класс. Если же  $V_t$  принадлежит  $B_2$ , то Работнику присваивается второй класс.

Неправильная классификация приводит к потерям. Задача состоит в том, чтобы определить подмножества  $B_1$  и  $B_2$ , при которых средние потери минимальны. Для этого можно использовать подход, развитый в [11]. Именно, для каждого неизвестного подмножества  $B_1$  и  $B_2$ , введем две функции потерь:

1.  $V_t - bf$  – потери в случае, если Директор считает, что  $V_t \in B_1$ , и присваивает Работнику первый класс (т.е. Директор считает загрязнение  $V_t$  приемлемым), в то время как на самом деле загрязнение  $V_t$  неприемлемо:  $V_t \in B_2, 0 < f < 1$ .

2.  $g(b - V_t)$  – потери в случае, если Директор считает, что  $V_t \in B_2$ , и присваивает Работнику второй класс (т.е. Директор считает загрязнение  $V_t$  неприемлемым), в то время как  $V_t \in B_1$  (т.е. загрязнение  $V_t$  приемлемо),  $g > 0$ .

Здесь  $b$  – неизвестный параметр, оценка которого  $b_{t+1}$  в периоде  $t + 1$  определяется из рекурсивного уравнения [11]:

$$b_{t+1} = C(b_t, V_t) = \begin{cases} b_t + \sigma_t f & \text{если } V_t \leq q_t \\ b_t - \sigma_t g & \text{если } V_t > q_t \end{cases}, b_0 = b^0, q_t = b_t(f + g)/(g + 1), \sum_{\tau=1}^{\infty} \sigma_{\tau} < \infty. \quad (10)$$

Предположим теперь, что Директор не знает  $V_t$ , но знает  $v_t$ . Тогда, для получения оценки  $c_{t+1}$  величины  $b_{t+1}$ , он может использовать формулу (10), в которой неизвестное  $V_t$  заменено на известное  $v_t$ :

$$c_{t+1} = C(c_t, v_t) = \begin{cases} c_t + \sigma_t f & \text{если } v_t \leq h_t \\ c_t - \sigma_t g & \text{если } v_t > h_t \end{cases}, c_0 = b^0, h_t = c_t(f + g)/(g + 1), \quad (11)$$

Процедура (11) называется процедурой цифрового самообучения Директора. С её помощью, Директор определяет класс Работника:

$$k_t = K(h_t, v_t) = \begin{cases} 1 & \text{if } v_t \leq h_t \\ 2 & \text{if } v_t > h_t \end{cases}. \quad (12)$$

Процедура (12) называется процедурой классификации. По сути,  $h_t$  – это норматив загрязнения, используемый Директором для определения класса Работника: при  $v_t \leq h_t$  Работнику присваивается первый класс, в противном случае – второй класс. Процедура самообучения (11) и процедура классификации (12) образуют механизм контроля загрязнения транспортным объектом  $T = (C, K)$ .

### 3.3. Решения Работника

Работник стремится повысить собственную полезность, которая зависит от текущих и будущих классов загрязнения окружающей среды транспортным объектом:

$$\Gamma_t = \Gamma[k_t, k_{t+1}, \dots, k_{t+\omega}], \Gamma_t \downarrow k_v, v = \overline{t, t + \omega}, \quad (13)$$

где  $\Gamma[k_t, k_{t+1}, \dots, k_{t+\omega}]$  – невозрастающая функция текущего и будущих классов,  $\omega$  – дальновидность Работника.

Неосведомленность Директора позволяет Работнику манипулировать загрязнением  $v_t, v_t \in B_t = [V_t, \mu], V_t \in B = [\psi, \mu]$ . Предполагается, что Работник знает о будущем лишь то, что  $v_{\varphi} \in B_{\varphi} = [V_{\varphi}, \mu], V_{\varphi} \in B = [\psi, \mu], \varphi = t + 1, t + \omega$ . При этом Работник исходит из того, что в периоде  $\varphi$  он выберет наилучшее (при случайной реализации  $V_{\varphi}$ ) значение  $v_{\varphi}, v_{\varphi} \leq V_{\varphi}$ , рассчитывая на худшие реализации  $V_{\varphi}, V_{\varphi} \in B, \varphi = t + 1, t + \omega$ . По сути, Работник руководствуется принципом максимального гарантированного результата [6] (см. п.2.2). Тогда целевая функция Работника  $Z_t(v_t)$  определяется как минимальное гарантированное значение полезности (13), которое зависит от текущего выбора  $v_t$ :

$$Z_t(v_t) = \min_{\varphi=t+1, t+\omega} \min_{V_{\varphi} \in B} \max_{v_{\varphi} \in B_{\varphi}} U_t \xrightarrow{v_t \in B_t} \max. \quad (14)$$

Соответственно, Работник выбирает  $v_t$  так, чтобы максимизировать целевую функцию (14). Следовательно, множество выборов Работника имеет вид:

$$\underset{v_t \in B_t}{\text{Argmax}} Z_t(v_t) = \{v_t^* | Z_t(v_t^*) \geq Z_t(v_t), v_t \in B_t\}. \quad (15)$$

### 3.4. Минимизация загрязнения транспортным объектом

**Утверждение 2.** Предположим, что Работник благожелателен по отношению к Директору: если  $V_t \in \underset{v_t \in B_t}{\text{Argmax}} Z_t(v_t)$ , то Работник выбирает  $v_t^* = V_t$ ,  $t = 0, 1, \dots$ . Тогда, чтобы минимизировать

загрязнения транспортным объектом в каждом периоде:  $v_t^* = V_t$ ,  $t = 0, 1, \dots$ , достаточно использовать механизм контроля загрязнения транспортным объектом  $T = (C, K)$ .

*Доказательство.* Механизм  $T = (C, K)$  включает процедуры (11) и (12). Согласно (12), класс  $k_t = K(h_t, v_t)$  не уменьшается с ростом  $v_t$ . Далее, рассматривая (11) как рекуррентное соотношение, нетрудно показать, что  $h_\varphi$  не увеличивается с уменьшением  $v_t$ ,  $\varphi = t + 1, t + \omega$ . Кроме того, согласно (12),  $k_\varphi = K(h_\varphi, v_\varphi)$  не растет с ростом  $h_\varphi$ . Таким образом,  $k_\varphi$  не снижается с ростом  $v_t$ ,  $\varphi = t + 1, t + \omega$ .

Следовательно, согласно (13),  $\Gamma_t$  не растет с ростом  $v_t$ . Но тогда, согласно (14),  $Z_t(v_t)$  не растет с ростом  $v_t$ . Следовательно,  $Z_t(v_t)$  достигает максимума при  $v_t = V_t$ . Но, по условию Утверждения 2, Работник благожелателен по отношению к Директору: если  $V_t \in \underset{v_t \in B_t}{\text{Argmax}} Z_t(v_t)$ , то Работник выбирает  $v_t^* = V_t$ ,  $t = 0, 1, \dots$ , ч.т.д.

## 4. Механизм контроля загрязнения окружающей среды холдингом

Объединяя механизм контроля загрязнения компанией  $M = (D, R)$  и контроль загрязнения транспортным объектом  $T = (C, K)$ , получаем механизм контроля загрязнения холдингом окружающей среды  $H = (M, T)$ . Рассмотрим пример реализации механизма  $H = (M, T)$  при техническом обслуживании пассажирских вагонов согласно концепции цифрового предприятия [13]. В [14] для изучения обслуживания таких вагонов использовалось агентное моделирование. В [15] рассмотрена многоканальная модель такого обслуживания.

Следуя методологии, разработанной в [13-15], рассмотрим модель контроля загрязнений при обслуживании пассажирских вагонов в холдинге «РЖД», как иерархию с тремя менеджерами (играющими роль агентов), связанными прямыми и обратными каналами. Топ-менеджер холдинга, ответственный за предоставление данной услуги, является прототипом Куратора. Ему подчиняется руководитель компании, занимающейся обслуживанием пассажирских вагонов холдинга. Этого руководителя можно считать прототипом Директора. Компания включает в себя объект транспортного сервиса, который предоставляет данную услугу и возглавляется Работником.

Топ-менеджер холдинга должен, учитывая мнение специалиста в области охраны окружающей среды (играющего роль Эксперта), мотивировать директора снижать загрязнения компанией. Как следует из вышесказанного, чтобы заинтересовать в этом директора, топ-менеджеру достаточно использовать механизм контроля загрязнения  $M = (D, R)$ . Именно, топ-менеджер периодически отслеживает загрязнение окружающей среды компанией при техническом обслуживании вагонов. Экологическая норма загрязнения, используемая топ-менеджером для определения ранга директора в каждом периоде, рассчитывается по (3). Затем по (6) топ-менеджер определяет ранг директора. При получении первого ранга, директор получает премию. Это стимулирует директора к снижению загрязнения компанией окружающей среды. Данный пример иллюстрирует простоту и прозрачность предложенного механизма контроля загрязнения окружающей среды холдингом.

## 5. Заключение

При построении системы экологической безопасности транспортного холдинга, необходимо разрабатывать и изучать модели иерархического контроля загрязнения окружающей среды в процессе работы компаний холдинга и их подразделений. На верхнем уровне этой системы находится ответственный топ-менеджер, который контролирует загрязнение холдингом окружающей среды в условиях неопределенности. При этом он использует консультации специалиста по экологии – эксперта. Директора транспортных компаний контролируют загрязнения, производимые как собственными подразделениями, так и партнерами, проводящими перевозки по аутсорсингу.

При этом вышестоящие менеджеры холдинга не знают минимально возможных загрязнений окружающей среды в результате деятельности нижестоящих менеджеров. Поэтому последние могут манипулировать указанными загрязнениями, чтобы увеличить своё стимулирование. Для изучения

этой проблемы, моделируется игра между топ-менеджером холдинга, директором компании и исполнителем. Определены правила этой игры – механизм контроля, при которых директор и исполнитель снижают загрязнение окружающей среды в пределах своей компетенции.

Дальнейшие исследования в этой области будут направлены на совершенствование такого рода механизмов контроля, путем включения в их состав более сложных процедур обучения менеджеров холдинга.

Полученные в работе результаты были использованы при совершенствовании системы экологической безопасности холдинга «РЖД», в части разработки концепции требований к тяговому подвижному составу холдинга в области загрязнения окружающей среды.

## Литература

1. *Духно Н.А.* Экологическая безопасность и транспорт // Транспортное право и безопасность. – 2019. – № 2. – С. 63–76.
2. *Сидоров Ю.П.* Практическая экология на железнодорожном транспорте. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. – 227 с.
3. Распоряжение Правительства РФ от 03.11.2023 г. № 3097-р об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации транспортной отрасли РФ до 2030 года. <https://mintrans.gov.ru/documents/2/12953> (дата обращения 28.04.2025).
4. *Fradkov A.* Early history of machine learning // IFAC-PapersOnLine. – 2020. – Vol. 53, № 2. – P. 1385–1390.
5. *Schipper B.* Unawareness – a gentle introduction to the literature // Mathematical Social Sciences. – 2014. – Vol. 70. – P. 1–9.
6. *Новиков Д.А.* Теория управления организационными системами. – 2-е изд. – М.: Физматлит, 2007. – 584 с.
7. *Цыганов В.В.* Интеллектуальное предприятие: механизмы овладения капиталом и властью / В.В. Цыганов, В.А. Бородин, Г.Б. Шишкин. – М.: Университетская книга, 2004. – 770 с.
8. *Recht B.* Reflections on learning-to-control renaissance // IFAC PapersOnLine. – 2020. – Vol. 53, № 1. – P. 275–280.
9. *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.
10. *Auster S.* Asymmetric awareness and moral hazard // Games and Economic Behavior. – 2013. – Vol. 82. – P. 503–521.
11. *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.
12. *Косяков А.* Системная инженерия. Принципы и практика / А. Косяков, У. Свит, С. Сеймур и др. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 624 с.
13. *Bannikov D., Sirina N.* Service maintenance and repair of passenger cars in the concept of Digital Enterprise // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 918. – P. 012168.
14. *Alexandrov A., Bannikov D., Sirina N.* Agent-based modeling of service maintenance repair of rolling stock // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 403. – P. 012193.
15. *Bannikov D., Sirina N., Smolyaninov A.* Model of the maintenance repair system in service maintenance management // Transport problems. – 2018. – Vol. 13, № 3. – P. 5–14.