



Artificial societies. 2013-2020

ISSN 2077-5180

URL - <http://artsoc.jes.su>

All right reserved

Issue 1 Volume 15. 2020

Agent-based modelling of mutual influence between horizontal-vertical greenery systems and air pollutants with the use of the city of Yerevan, Armenia as a case study

A. Akopov

*Central Economics and Mathematics Institute RAS
Russian Federation, Moscow*

L. Beklaryan

*Central Economics and Mathematics Institute RAS
Russian Federation, Moscow*

A. Saghatelyan

*Center for Ecological-Noosphere Studies National Academy of Sciences
Armenia, Yerevan*

O. Belyaeva

*Center for Ecological-Noosphere Studies National Academy of Sciences
Armenia, Yerevan*

L. Sahakyan

*Center for Ecological-Noosphere Studies National Academy of Sciences
Armenia, Yerevan*

G. Tepanosyan

*Center for Ecological-Noosphere Studies National Academy of Sciences
Armenia, Yerevan*

Abstract

This article presents a new approach to modelling horizontal and vertical greenery systems interacting with harmful air pollutants using the city of Yerevan, the Republic of Armenia as a case

study. A main feature of this method is the combination of an agent-based model of the air pollution distribution in the city with the suggested simplified Gaussian air pollutants dispersion model. A new agent-based model has been developed and implemented in the AnyLogic that takes into account the mutual influence between horizontal-vertical greenery systems and air pollutants. It allows, in particular, controlling the characteristics of such a system at the individual level of greenery clusters. A bi-criterion optimization problem is formulated and solved to minimize the average daily concentration of air pollution and the greening budget.

Keywords list (en): greening the city, agent-based modeling, AnyLogic, Armenia, ecological-economic systems, air pollutants.

Date of publication: 13.03.2020

Acknowledgment:

Исследование выполнено при совместной финансовой поддержке РФФИ и Комитета по науке МОНКС РА в рамках научных проектов №№ 18-51-05004 и 18RF-092.

Citation link:

Akopov A., Beklaryan L., Belyaeva O., Saghatelyan A., Sahakyan L., Tepanosyan G. Agent-based modelling of mutual influence between horizontal-vertical greenery systems and air pollutants with the use of the city of Yerevan, Armenia as a case study // *Artificial societies*. 2020. V. 15. Issue 1 [Electronic resource]. Access for registered users. URL: <https://artsoc.jes.su/s207751800008317-7-1/> (circulation date: 09.08.2020). DOI: 10.18254/S207751800008317-7

1 **Введение**

Влияние вредных атмосферных выбросов на здоровье человека носит явно выраженный отрицательный характер, подтверждаемый многими исследованиями [7]. При этом, наиболее вредное воздействие оказывается на организм детей дошкольного и школьного возраста, длительно находящихся вблизи стационарных или мобильных источников выбросов, например, проживающих рядом с предприятием, добывающим полезные ископаемые открытым способом. Существуют различные методы снижения подобных экологических рисков, в частности, экологическая модернизация предприятий (переход к малоотходному производству) [4, 3], использование зеленых насаждений, высаживаемых вокруг предприятий и объектов социального значения (школ, больниц, детских садов [1, 2]. Вместе с тем, в условиях существенного дефицита финансовых ресурсов на экологическую модернизацию и глобальное городское озеленение, актуализируется задача разработки и внедрения мало затратных, и при этом, эффективных систем защиты от вредных атмосферных выбросов класса *Natural-based solutions – NBS* (решения, основанные на возможностях самой природы) [10, 12] и *Vertical greening systems – VGS* (системы вертикального озеленения) [9]. При этом, существует мировой опыт развития подобных систем, в частности, VGS активно используются в отдельных городах США, Великобритании, Испании и др.¹ Также подобный опыт имеется и у Республики Армения, в частности, в г. Ереван (рис 1).



Рис. 1. Системы вертикального озеленения в г. Ереван, Республика Армения

3 Системы вертикального озеленения могут быть реализованы для фасадов зданий, крыш, балконов, лестниц и др. При этом, в качестве зеленых насаждений, для г. Ереван преимущественно используется дикий виноград, что обусловлено, как его хорошими абсорбционными характеристиками (т.е. способностью поглощать вредные выбросы) и устойчивостью в природных и экологических условиях г. Еревана, так и более низкой (по сравнению с другими видами лиан) стоимостью посадки и дальнейшей поддержки.

4 Важной особенностью г. Ереван является то, что город расположен на высоте от 850 до 1420 м. над уровнем моря на вулканическом плато к северу от Араратской долины. В г. Ереван более 300 солнечных дней в году, при этом, имеется некоторый дефицит осадков. Вокруг города и в непосредственной близости к жилым массивам расположены несколько карьеров в которых ведется добыча полезных ископаемых, в частности, базальта, туфа, щебня, глины, соли и др. В воздухе наблюдается высокая концентрация вредных выбросов, в частности, пылевых частиц [6, 11]. К сожалению, сокращение объемов добычи и переход к высокотехнологичному и малоотходному производству пока невозможен из-за существенного дефицита инвестиционного капитала. Подобная ситуация обуславливает необходимость разработки специальных мер по снижению концентрации вредных веществ в атмосфере города, как минимум в зонах расположения социально значимых объектов, например, для детских садов, расположенных рядом с подобными источниками выбросов.

5 Данная статья посвящена разработке агентной модели взаимовлияния систем горизонтально-вертикального озеленения и вредных выбросов на примере г. Ереван, Республика Армения. Подобная модель позволяет сформировать стратегию эффективной экологической защиты социально значимых объектов (например, детских садов) в условиях дефицита финансовых ресурсов с использованием систем вертикального озеленения.

6 **Агентная модель взаимовлияния систем вертикального озеленения и вредных выбросов**

Общая концепция предлагаемой имитационной модели взаимовлияния систем горизонтально-вертикального озеленения и вредных выбросов основана на ранее разработанном подходе к моделированию и оптимизации стратегии озеленения города [4, 5]. Подобный подход предполагает использование зеленых насаждений, вокруг стационарных источников выбросов (например, добывающих предприятий) и социально значимых объектов. Вместе с тем, ранее предложенный метод моделирования взаимовлияния вредных выбросов и

зеленых насаждений не учитывал некоторые важные особенности изучаемой эколого-экономической системы, в частности, следующие:

- 7 • возможности внедрения систем вертикального озеленения (VGS);
- влияние важных характеристик стационарных источников вредных выбросов на пространственную динамику агентов-выбросов (например, высота эксплуатируемых карьеров над уровнем моря, влияние транспорта, работающего в карьерах, эффект рассеивания концентрации выбросов из-за влияния бокового ветра и др.).

8 Чтобы учесть подобные особенности мы интегрировали ранее разработанный агент-ориентированный подход к моделированию взаимовлияния вредных выбросов и зеленых насаждений с предложенной упрощенной Гауссовой моделью дисперсии вредных выбросов, учитывающей наиболее важные характеристики стационарных источников загрязнения.

9 Отметим, что использование Гауссовых моделей рассеивания вредных выбросов [13], является наиболее известным подходом для оценки и прогнозирования концентрации вредных веществ в атмосфере. Однако, данный подход до сих пор, не учитывал влияние множественных агентов городской среды (например, зданий, зеленых насаждений и др.) на концентрацию и рассеивание вредных выбросов, так как, оценка концентрации вредных веществ в атмосфере в подобных моделях проводится на основе усредненных характеристик системы для всей зоны рассеивания, определяемой направлением факельного распространения (превалирующим направлением ветра). Будем рассматривать следующие типы взаимодействующих агентов:

- 10 • агенты-выбросы, производимые различными источниками и дифференцируемые по видам выбросов (например, пыль, SO_2 , NO_x , CO_2 и др.);
- агенты - деревья, в том числе, VGS (задания и сооружения, имеющие систему вертикального озеленения), представляющие собой группу (до 10) близко расположенных растений одного вида (например, тополь, дуб, сосна, вяз, дикий виноград и др.) и обеспечивающие абсорбционный и диффузионный эффекты по отношению к выбросам;
- агенты-предприятия, являющиеся стационарными источниками выбросов, и осуществляющие добычу полезных ископаемых в карьерах, расположенных вблизи г. Ереван, Республика Армения;
- агенты - транспортные средства (кластеры автомобилей), расположенные на дорогах города и осуществляющие выбросы вредных веществ.

11 Важной особенностью предлагаемой агентной модели является понятие радиуса личного пространства агента-выброса, начальное значение длины которого зависит от мощности источника выбросов. При этом, каждый агент-выброс содержит только один вид вредного вещества (например, пыль, CO_2), концентрация которого является функцией личного пространства агента.

12 При каждом взаимодействии (контакте) с зелеными насаждениями, радиус агента-выброса уменьшается в зависимости от абсорбционных характеристик соответствующих деревьев и систем вертикального озеленения. При уменьшении радиуса до некоторого порогового значения, агент-выброс проходит сквозь соответствующий кластер зеленых насаждений. При этом, концентрация вредных веществ, задаваемая как площадь личного пространства агента-выброса, уменьшается. Также учитывается полная диссипация агентов-выбросов с течением длительного времени из-за эффекта рассеивания.

13 Далее, представим краткое формальное разработанной модели. Введем, следующие

обозначения:

- 14 • T – набор временных моментов (по дням), $|T|$ – общее количество временных моментов; $t_0 \in T$, $t_{|T|} \in T$ – начальные и конечные моменты времени, $t_r \in T$, $r = 0, \dots, |T|$ – все моменты времени;
- $I = \{1, 2, \dots, |I|\}$ – набор индексов ($i \in I$) источников выбросов (добывающих предприятий, транспортных средств и др.), где $|I|$ – общее количество источников выбросов;
- $V = \{1, 2, \dots, |V|\}$ – набор индексов типов ($v \in V$) выбросов (например, пыль, SO₂, NO_x, CO и др.), где $|V|$ – общее количество типов выбросов;
- $J_{iv} = \{1, 2, \dots, |J_{iv}|\}$ – для каждой пары ($i \in I, v \in V$) набор индексов ($j_{iv} \in J_{iv}$) агентов-выбросов, где $|J_{iv}|$ – общее количество агентов-выбросов в атмосфере города при заданных $i \in I, v \in V$;
- $P = \{1, 2, \dots, |P|\}$ – набор индексов защищаемых городских зон (детских садов), в которых оценивается среднесуточная концентрация вредных выбросов.
- $r_{j_{iv}}(t_r)$ – радиус личного пространства j_{iv} -ого агента-выброса ($j_{iv} \in J_{iv}, i \in I, v \in V$) в момент времени $t_r, t_r \in T$;
- $\{\hat{x}_p, \hat{y}_p\}$ – известные координаты (центра) p -ой защищаемой городской зоны ($p \in P$);
- $\{\tilde{x}_{j_{iv}}(t_r), \tilde{y}_{j_{iv}}(t_r)\}$ – координаты j_{iv} -ого агента-выброса ($j_{iv} \in J_{iv}, i \in I, v \in V$) в момент времени $t_r, t_r \in T$;
- \hat{R}_p – известный радиус личного пространства p -ой защищаемой городской зоны $p \in P$ (определяемый размерами соответствующего объекта);
- $st_{j_{iv}}(t_r) \in \{0, 1\}$ – состояние j_{iv} -ого агента-выброса ($j_{iv} \in J_{iv}, i \in I, v \in V$) в момент времени $t_r, t_r \in T$: при $st_{j_{iv}}(t_r) = 0$ выброс не активен (полностью рассеян в атмосфере), при $st_{j_{iv}}(t_r) = 1$ выброс находится в активном состоянии и имеет ненулевой радиус личного пространства;
- κ_v – весовой коэффициент, определяющий значимость v -го вида выброса

15 ($v \in V$), для лица принимающего решения: $\sum_{v=1}^{|V|} \kappa_v = 1, 0 \leq \kappa_v \leq 1$.

16 *С учетом выше сделанных обозначений, среднесуточная концентрация вредных выбросов в защищаемых городских районах:*

17

$$DC(t_r) = \frac{1}{|P||V|} \sum_{p=1}^{|P|} \sum_{i=1}^{|I|} \sum_{v=1}^{|V|} \left(\kappa_v \sum_{j_{iv}=1}^{|J_{iv}|} g_{j_{iv}p}(t_r) \right), \text{ где}$$

$$g_{j_{iv}p} \left(t_r \right) = \begin{cases} m_{j_{iv}}^2 \left(t_r \right), & \text{если } \sqrt{\left(\tilde{x}_{j_{iv}} \left(t_r \right) - \hat{x}_p \right)^2 + \left(\tilde{y}_{j_{iv}} \left(t_r \right) - \hat{y}_p \right)^2} \leq \hat{R}_p \text{ и } st_{j_{iv}} \left(t_r \right) = 1, \\ 0, & \text{если } \sqrt{\left(\tilde{x}_{j_{iv}} \left(t_r \right) - \hat{x}_p \right)^2 + \left(\tilde{y}_{j_{iv}} \left(t_r \right) - \hat{y}_p \right)^2} > \hat{R}_p, \end{cases}$$

$$j_{iv} \in J_{iv}, i \in I, v \in V, p \in P, t_r \in T.$$

Формула (1) учитывает вклад каждого вида выбросов, наблюдаемого в зонах личного пространства защищаемых городских районов, с учетом значимости для рассматриваемой эколого-экономической системы. При решении задачи минимизации концентрации вредных веществ предпочтение будет отдано стратегиям озеленения, сокращающим наиболее значимые виды вредных выбросов. Пусть,

$Z = \{1, 2, \dots, |Z|\}$ – набор индексов ($z \in Z$) кластеров зеленых насаждений, где $|Z|$ – общее количество кластеров зеленых насаждений;

$K_z = \{1, 2, \dots, |K_z|\}$ – набор индексов ($k_z \in K_z$) агентов-деревьев, в том числе, VGS, принадлежащих z -ым кластерам ($z \in Z$);

$T_{j_{iv}}$ – момент времени генерации (производства) j_{iv} -го агента-выброса ($j_{iv} \in J_{iv}, i \in I, v \in V$), $T_{j_{iv}} \in T$;

$d_{j_{iv}k_z} \left(t_r \right)$ – евклидово расстояние между j_{iv} -ым агентом-выбросом ($j_{iv} \in J_{iv}, i \in I, v \in V$) и k_z -ым агентом-деревом ($k_z \in K_z$) в момент времени t_r , $t_r \in T$;

$R_{k_z} \left(t_r \right)$ – радиус личного пространства k_z -ого агента-дерева ($k_z \in K_z$) в момент времени t_r , $t_r \in T$ (зависящий от времен года);

ϖ – коэффициент, определяющий пороговое соотношение радиусов личных пространств агента-выброса и агента-дерева, при котором возникает диффузионный эффект (при данном эффекте агент-выброс проходит сквозь агента-дерево);

$\eta_{j_{iv}}$ – коэффициент, определяющий темпы естественного снижения радиуса агента-выброса ($j_{iv} \in J_{iv}, i \in I, v \in V$) вследствие атмосферного рассеивания, $\eta_{j_{iv}} > 0$;

$\mu_{k_z v}$ – коэффициент абсорбции (поглощения) v -го вида выброса ($v \in V$) со стороны k_z -ого агента-дерева ($k_z \in K_z$), $0 \leq \mu_{k_z v} \leq 1$;

$s_{j_{iv}} \left(t_r \right)$ – скорость перемещения $j_{i,v}$ -ого агента-выброса ($j_{iv} \in J_{iv}, i \in I, v \in V$), определяемая скоростью ветра и высотой расположения i -ого источника выбросов над уровнем моря в момент времени t_r , $t_r \in T$;

30

$\xi_{j_{iv}k_z}(t_r)$ – событие, при котором реализуется контактное взаимодействие между $J_{i,v}$ -

ым агентом-выбросом ($j_{iv} \in J_{iv}, i \in I, v \in V$) и k_z -ым агентом-деревом ($k_z \in K_z$):

31

$$\xi_{j_{iv}k_z}(t_r) \in \begin{cases} 1, \text{ если } d_{j_{iv}k_z}(t_r) \leq r_{j_{iv}}(t_r) + R_{k_z}(t_r), \\ 0, \text{ если } d_{j_{iv}k_z}(t_r) > r_{j_{iv}}(t_r) + R_{k_z}(t_r). \end{cases}$$

32

Радиус личного пространства J_{iv} -ого агента-выброса ($j_{iv} \in J_{iv}, i \in I, v \in V$) задается с учетом возможных контактов выбросов с кластерами зеленых насаждений в каждый момент времени в момент времени $t_r, t_r \in T$:

33

$$r_{j_{iv}}(t_r) = \begin{cases} r_{j_{iv}}(T_{j_{iv}}), \text{ если выполняется I,} \\ r_{j_{iv}}(t_{r-1})e^{-\eta_{j_{iv}}}, \text{ если выполняется II,} \\ r_{j_{iv}}(t_{r-1})e^{-\eta_{j_{iv}}\mu_{k_z v}}, \text{ если выполняется III,} \\ 0, \text{ если выполняется IV,} \end{cases}, \text{ где}$$

34 I. $tr = T_{j_{iv}}$,35 II. $\xi_{j_{iv}k_z}(tr) = 0$ или $r_{j_{iv}}(tr) < R_{k_z}(tr) / \omega_{stj_{iv}}(tr) = 1$,36 III. $\xi_{j_{iv}k_z}(tr) \neq 0$ и $r_{j_{iv}}(tr) \geq R_{k_z}(tr) / \omega_{stj_{iv}}(tr) = 1$,37 IV. $st_{j_{iv}}(tr) = 0$.

38 Тогда, пространственная динамика каждого агента-выброса в момент времени $t_r (t_r \in T)$ задается с помощью системы конечно-разностных уравнений с переменной структурой:

39

$$\tilde{x}_{j_{iv}}(t_r) = \begin{cases} \tilde{x}_{j_{iv}}(t_{r-1}) + s_{j_{iv}}(t_{r-1}) \cos \alpha_{j_{iv}}(t_{r-1}), \text{ если выполняется V,} \\ \tilde{x}_{j_{iv}}(t_{r-1}) + s_{j_{iv}}(t_{r-1}) \cos(\pm \beta_{j_{iv}k_z}(t_{r-1})) + \frac{\tilde{c}}{d_{j_{iv}k_z}(t_{r-1})} \cos \gamma_{j_{iv}}(t_{r-1}), \text{ если выполняет} \\ 0, \text{ если выполняется VI,} \end{cases}$$

$$\tilde{y}_{j_{iv}} \begin{pmatrix} t_r \\ \end{pmatrix} = \begin{cases} \tilde{y}_{j_{iv}}(t_{r-1}) + s_{j_{iv}}(t_{r-1}) \sin \alpha_{j_{iv}}(t_{r-1}), & \text{если выполняется V,} \\ \tilde{y}_{j_{iv}}(t_{r-1}) + s_{j_{iv}}(t_{r-1}) \sin(\pm \beta_{j_{iv}k_z}(t_{r-1})) + \frac{\tilde{c}}{d_{j_{iv}k_z}(t_{r-1})} \sin \gamma_{j_{iv}}(t_{r-1}), & \text{если выполняется} \\ 0, & \text{если выполняется VII,} \end{cases}$$

41 $i \in I, v \in V, j_{iv} \in J_{iv}, z \in Z, k_z \in K_z$, где

42 V. $d_{j_{iv}k_z}(tr-1) > r_{j_{iv}}(tr-1) + R_{k_z}(tr-1)$ для всех $k_z \in K_z$ и $r_{j_{iv}}(tr-1) < R_{k_z}(tr-1) / \tilde{w}$ для ближайшего $k_z \in K_z$ и $t_{j_{iv}}(tr-1) = 1$,

43 VI. $d_{j_{iv}k_z}(tr-1) \leq r_{j_{iv}}(tr-1) + R_{k_z}(tr-1)$ для ближайшего $k_z \in K_z$ и $r_{j_{iv}}(tr-1) \geq R_{k_z}(tr-1) / \tilde{w}$ для ближайшего $k_z \in K_z$ и $t_{j_{iv}}(tr-1) = 1$,

44 VII. $d_{j_{iv}k_z}(tr-1) \leq r_{j_{iv}}(tr-1) + R_{k_z}(tr-1)$ и $r_{j_{iv}}(tr-1) \geq R_{k_z}(tr-1) / \tilde{w}$ для всех $k_z \in K_z$ и $t_{j_{iv}}(tr-1) = 0$.

45 Здесь,

46 $\beta_{j_{iv}k_z}(t_r)$ – угол обхода j_{iv} -ого агента-выброса ($j_{iv} \in J_{iv}, i \in I, v \in V$) k_z -ого агента-дерева ($k_z \in K_z, z \in Z$) в момент времени $t_r, t_r \in T$;

47 $\gamma_{j_{iv}k_z}(t_r)$ – угол отскока j_{iv} -ого агента-выброса ($j_{iv} \in J_{iv}, i \in I, v \in V$) от k_z -ого агента-дерева ($k_z \in K_z, z \in Z$) в момент времени $t_r, t_r \in T$;

48 \tilde{c} – коэффициент, определяющий «силу отскока» $\tilde{c} \geq 1$;

49 $\alpha_{j_{iv}}(t_r)$ – дирекционный угол перемещения j_{iv} -ого агента-выброса ($j_{iv} \in J_{iv}, i \in I, v \in V$) в момент времени $t_r, t_r \in T$, вычисляемый с использованием предложенной упрощенной Гауссовой модели:

$$\alpha_{j_{iv}} \begin{pmatrix} t \\ \end{pmatrix} = \begin{cases} F_{j_{iv}}(\alpha_{j_{iv}}^*(t_r)), & \text{если } w(0,1) < -\frac{g}{i}, \\ \tilde{F}_{j_{iv}}(\alpha_{j_{iv}}^*(t_r)), & \text{если } w(0,1) \geq -\frac{g}{i}, \end{cases} \text{ где}$$

51 $w(0,1)$ – случайная величина, равномерно распределенная на отрезке $[0,1]$;

– доля агентов-выбросов, произведенных i -ым источником выбросов ($i \in I$),

имеющим Гауссово распределение $\left(0 \leq \frac{g}{i} \leq 1\right)$;

53

$F_{j_{iv}}\left(\alpha_{j_{iv}}^*(t_r)\right)$ – равномерное распределение дирекционного угла $\alpha_{j_{iv}}^*(t_r)$, случайно распределенного на отрезке от 0 до 2π , обусловленное влиянием транспорта задействованного на территории соответствующих добывающих предприятий (карьеров);

54

$\tilde{F}_{j_{iv}}\left(\alpha_{j_{iv}}^*(t_r)\right)$ – Гауссово распределение дирекционного угла перемещения агента-выброса:

55

$$\tilde{F}_{j_{iv}}\left(\alpha_{j_{iv}}^*(t_r)\right) = \frac{f_{j_{iv}}(t_r)}{\sigma_{iv}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\alpha_{j_{iv}}^*(t_r) - \theta(t_r))^2}{2\sigma_{iv}^2}},$$

56

$j_{iv} \in J_{iv}, i \in I, v \in V, t_r \in T$, где

57

$f_{j_{iv}}(t_r)$ – параметр рассеивания, в следствие воздействия бокового ветра:

58

$$f_{j_{iv}}(t_r) = e^{-\frac{(\alpha_{j_{iv}}^*(t_r))^2}{2\sigma_{iv}^2}}$$

59 σ_{iv} – горизонтальное стандартное отклонение распределения агентов-выбросов ($i \in I, v \in V$);

60 $\Theta(tr)$ – превалирующее (доминантное) направление ветра в городе в момент времени tr ($tr \in T$), задаваемое в соответствии со следующими значениями, известными для г. Ереван [2] (Табл. 1).

61 Таблица 1. Превалирующее направление и скорость ветра в г. Ереван, Армения

№ Месяца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Превалирующее направление ветра	ЮЗ (225 ⁰)	СВ (45 ⁰)	ЮЗ (225 ⁰)	ЮЗ (225 ⁰)	СВ (45 ⁰)	С (0 ⁰)	СВ (45 ⁰)	СВ (45 ⁰)	СВ (45 ⁰)	З (270 ⁰)	ЮЗ (225 ⁰)	З (270 ⁰)
Средняя скорость ветра, м/с	0.6	1	1	1.7	1.7	2.2	2.7	2.2	1.4	0.8	0.7	0.5

62 Предложенная Гауссова модель распределения агентов-выбросов проиллюстрирована на рис. 2.

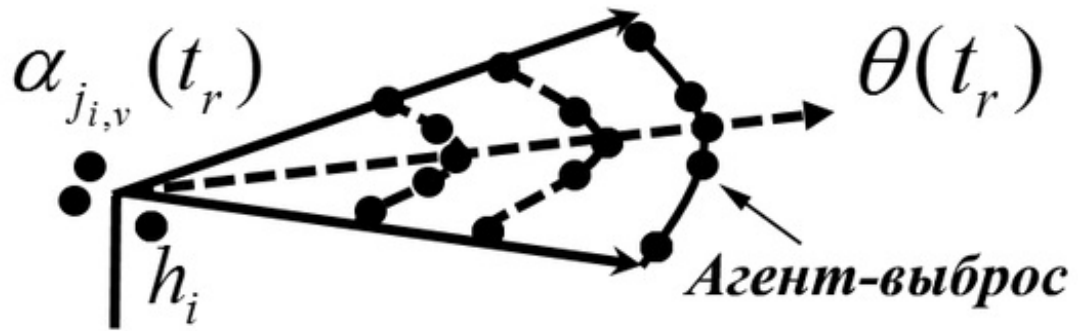


Рис. 2. Иллюстрация упрощенной Гауссовой модели распределения агентов-выбросов

64 Скорость перемещения j_{iv} -ого агента-выброса ($j_{iv} \in J_{iv}, i \in I, v \in V$) в каждый момент времени t_r ($t_r \in T$) задается с учетом скорости ветра (Табл. 1), высоты размещения i -ого источника над уровнем моря и возможного столкновения с препятствиями (например, агентами-деревьями):

$$65 \quad s_{j_{iv}}^i(t_r) = \begin{cases} s_{j_{iv}}^i(t_{r-1}) + \tilde{s}(\tau_{j_{iv}}) h_i u(t_r), & \text{если выполняется VI,} \\ s_{j_{iv}}^i(t_{r-1}), & \text{если выполняется VII,} \\ 0, & \text{если выполняется VIII,} \end{cases} \quad , \text{ где}$$

66 $s_{j_{iv}}^i(t_0)$ – известная скорость ветра в момент времени t_0 ;

67 $\tilde{s}(\tau_{j_{iv}})$ – известная скорость ветра в момент генерации j_{iv} -ого агента-выброса ($j_{iv} \in J_{iv}, i \in I, v \in V$), $\tau_{j_{iv}} \in T$.

68 $u(t_r)$ – коэффициент, задающий влияние высоты расположения источника выбросов на скорость перемещения соответствующих агентов-выбросов: $u(t_r) = e^{-t_r}$;

69 h_i – высота размещения i -ого источника выбросов над уровнем моря ($i \in I$) .

70 Отметим, что основное упрощение предложенной здесь Гауссовой модели связано с исключением рассмотрения эффекта вертикального рассеивания и вертикальной дисперсии концентрации выбросов, что обусловлено спецификой рассматриваемой системы (3)-(4), ограниченной рассмотрением пространственной динамики агентов-выбросов в двумерной плоскости. Переход к более реалистичной трехмерной модели требует формирования уточненной информации о высоте зданий, на которых потенциально реализуемы системы вертикального озеленения.

71 Пусть, $\{a_z(t_0), b_z(t_0), \delta_z(t_0), \tilde{R}_z(t_0)\}$ – набор управляющих параметров системы вертикально-горизонтального озеленения города задаваемых в начальный момент времени

$t_0 \in T$ для каждого z -ого кластера ($z \in Z$), в частности, следующие:

- 72 • $a_z(t_0) \in A$ – геометрия системы горизонтального озеленения, $A = \{0, 1, 2, 3, 4\}$, (0 – без озеленения, 1 – простая окружность, 2 – арифметическая спираль, 3 – двойная окружность и др.);
- $b_z(t_0) \in B$ – вид дерева, $B = \{1, 2, 3, 4\}$, (1 – тополь, 2 – дуб, 3 – клен и др.);
- $\delta_z(t_0)$ – расстояние между агентами-деревьями в кластере, $\delta \leq \delta_z(t_0) \leq \bar{\delta}$ (– – минимально допустимое расстояние, $\bar{\delta}$ – максимально допустимое расстояние);
- $\tilde{R}_z(t_0)$ – радиус кластера, определяющий зону посадки агентов-деревьев, $\tilde{R} \leq \delta_z(t_0) \leq \tilde{R}$ (– – минимальный радиус кластера, \tilde{R} – максимальный радиус кластера);

73 Определим следующие величины.

74 *Среднесуточная концентрация вредных выбросов в атмосфере (ADC), наблюдаемая в защищаемых городских районах.*

75
$$ADC = \frac{1}{|T|} \sum_{t_r=t_0}^{|T|} DC(t_r).$$

76 *Бюджет на озеленение (GB).*

77
$$GB = \sum_{z=1}^{|Z|} \sum_{k_z} |c_{k_z}| n_z(a_z(t_0), \tilde{R}_z(t_0), \delta_z(t_0)),$$
 где

78 c_{k_z} – стоимость посадки и годовой поддержки k_z -ого агента-дерева ($k_z \in K_z$) в z -ом кластере ($z \in Z$);

79 n_z – количество агентов-деревьев в z -ом кластере ($z \in Z$), зависящее от геометрии системы озеленения ($a_z(t_0) \in A$), радиуса посадки ($\tilde{R}_z(t_0)$) и расстояния между деревьями ($\delta_z(t_0)$): $n_z = 0$ – при отсутствии озеленения, $n_z = 1$ для систем вертикального озеленения и $n_z > 1$ для систем горизонтального озеленения.

80 Теперь можно сформулировать задачу оптимизации характеристик системы озеленения города.

81 **Задача.** *Требуется минимизировать среднесуточную концентрацию вредных выбросов в атмосфере и бюджет на вертикально-горизонтальное озеленение по набору управляющих параметров $\{a_z(t_0), b_z(t_0), \delta_z(t_0), \tilde{R}_z(t_0)\}$:*

82 \min
 $\{a_z(t_0), b_z(t_0), \delta_z(t_0), \tilde{R}_z(t_0)\}_{[ADC]},$

83 \min
 $\{a_z(t_0), b_z(t_0), \delta_z(t_0), \tilde{R}_z(t_0)\}_{[GB]},$

84 при ограничениях $a_z(t_0) \in A, b_z(t_0) \in B, -\delta \leq \delta_z(t_0) \leq \bar{\delta}, -\tilde{R} \leq \delta_z(t_0) \leq \tilde{R}.$

85 1. **Программная реализация модели**

Для компьютерной реализации разработанной имитационной модели (1)-(12) используется система AnyLogic, поддерживающая в частности методы агентного имитационного моделирования (рис. 3).

86

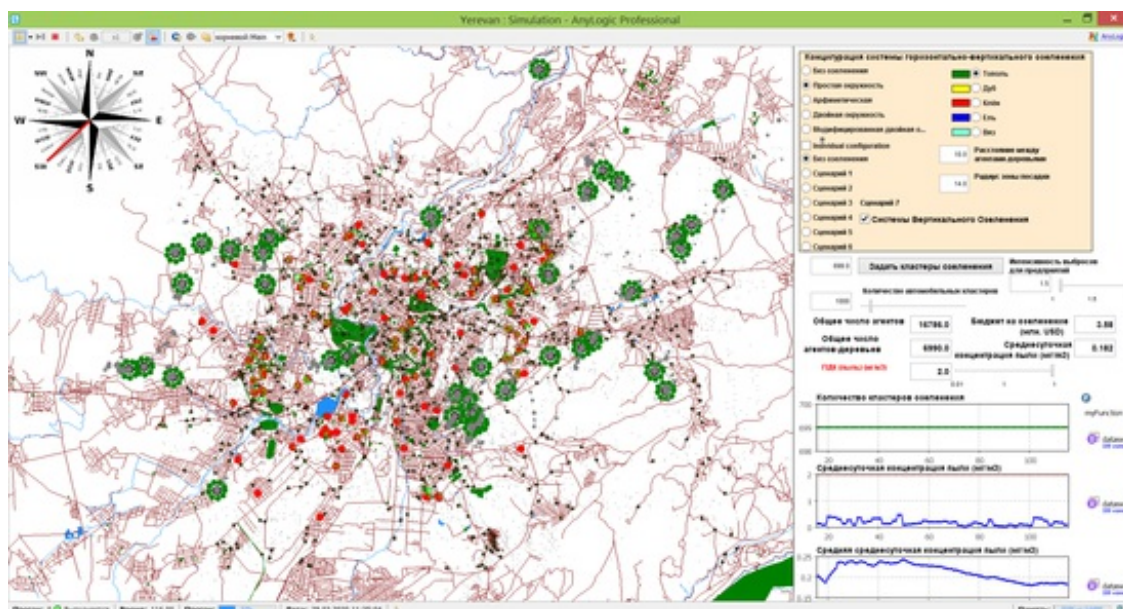


Рис. 3. Имитационная модель взаимовлияния систем горизонтально-вертикального озеленения и вредных выбросов для г. Ереван, Республика Армения

87 Важной особенностью разработанной имитационной модели (рис.3) является возможность комбинирования систем горизонтального (посадка деревьев вокруг детских садов, добывающих предприятий и др.) и вертикального озеленения. При этом, можно задавать различные конфигурации систем горизонтального и вертикального озеленения, в том числе выбирать тип используемых деревьев, устанавливать геометрию кластеров озеленения и др. Для численной реализации подобной модели были разработаны оригинальные Java-классы, обеспечивающие возможность создания крупномасштабных агент-ориентированных взаимодействующих систем (десятки тысяч агентов), в частности, следующих:

- 88 • Класс **MyEmission** – предназначенный для реализации агентов-предприятий, осуществляющих добычу полезных ископаемых в карьерах
- Класс **MyEnterprise** – предназначенный для реализации агентов-предприятий, осуществляющих добычу полезных ископаемых в карьерах и генерацию агентов-выбросов с заданной интенсивностью.
- Класс **MyVehicle** – предназначенный для реализации агентов-транспортных

средств (автомобильных кластеров), расположенных на дорогах города и осуществляющих генерацию агентов-выбросов с заданной интенсивностью.

- Класс **MyKindergarten** – предназначенный для реализации защищаемых городских районов (детских садов) со своими индивидуальными характеристиками.
- Класс **MyTree** — предназначенный для реализации агентов-деревьев со своими индивидуальными характеристиками.

89 Исходные данные для модели были предоставлены Центром эколого-ноосферных исследований НАН РА (cens.am). Также были использованы официальные данные статического управления Министерства окружающей среды Республики Армения.

90 Для решения оптимизационной задачи (11)-(12) был использован ранее разработанный генетический оптимизационный алгоритм с вещественным кодированием (MA-RCGA) [5], позволяющий, в частности, решать оптимизационные задачи большой размерности, в которых значения целевых функционалов являются результатом имитационного моделирования («black-box optimization»). При этом алгоритм MA-RCGA был модифицирован для решения би-критериальных задач типа (11)-(12) на основе комбинирования методов SPEA2 [14] и NSGA2 [8], реализуемых на уровне каждого агента-процесса в параллельно генетическом алгоритме. Подобный подход позволяет формировать Парето-оптимальные решения с высокой временной эффективностью и точностью (главным образом, за счет использования операторов вещественного кодирования) в условиях, когда целевые функционалы вычисляются в AnyLogic и не могут быть представлены аналитически.

91 1. Результаты численных экспериментов

Результаты численных экспериментов на примере пылевых выбросов, производимых предприятиями, добывающими полезные ископаемые (например базальт и др.) в г. Ереван, Республика Армения представлены в таблице 2 и на рис. 4. При этом, оценка усредненной среднесуточной концентрации пыли осуществляется в защищаемых городских районах – детских садах, расположенных в городе.

92 Таблица 2. Результаты численных экспериментов для г. Ереван, Республика Армения

Конфигурация кластеров озеленения	Виды деревьев	Средняя среднесуточная концентрация пыли (мг/м ³)	Greenery Budget (m USD)
Без озеленения		2.050	0.00
Простая окружность (для всех кластеров)	Тополь	0.385	3.16
	Дуб	0.939	2.46
	Клен	0.891	2.11
	Ель	0.903	3.51
	Вяз	0.840	3.51
Арифметическая спираль (для всех кластеров)	Тополь	1.003	1.75
	Дуб	1.289	1.36
	Клен	1.387	1.17
	Ель	1.467	1.95
	Вяз	1.461	1.95
Двойная окружность (для всех кластеров)	Тополь	0.365	6.32
	Дуб	0.831	4.91
	Клен	0.882	4.21
	Ель	0.817	7.02

	Вяз	0.811	7.02
Смешанные индивидуальные конфигурации (для разных кластеров)	Тополь,		
	Дуб, Ель,	1.549	2.41
	Вяз		
Использование систем вертикального озеленения для зданий расположенных вблизи детских садов	Дикий виноград	0.637	0.42

93



Рис. 4. Фронт Парето для решаемой би-критериальной оптимизационной задачи

94 Из табл. 2 и рис. 4 следует, что использование систем вертикального озеленения для зданий, расположенных вблизи детских садов, позволяет минимизировать концентрацию вредных выбросов (**0.637 мг/м³**) при существенно меньшем бюджете на озеленение (**0.42** млн. USD). Таким образом, данная стратегия озеленения является наиболее предпочтительной.

95 В данной статье представлен новый подход к моделированию сложной системы горизонтально-вертикального озеленения и вредных выбросов на примере г. Ереван, Республика Армения. Особенностью данного подхода является комбинирование агент-ориентированной модели распространения вредных выбросов с предложенной упрощенной Гауссовой моделью рассеивания вредных веществ в атмосфере (обусловленной влиянием бокового ветра). В результате удалось изучить возможности внедрения систем вертикального озеленения (VGS) для зданий, расположенных вблизи социально значимых объектов (в частности, детских садов). При этом учитывается влияние важных характеристик стационарных источников вредных выбросов (предприятий, добывающих полезные ископаемые в карьерах вокруг г. Ереван) на пространственную динамику агентов-выбросов.

96 Сформулирована и решена, с использованием параллельного генетического алгоритма, важная задача по минимизации усредненной среднесуточной концентрации вредных атмосферных выбросов и бюджета на озеленение. Определен наиболее предпочтительный сценарий защиты социально значимых объектов от выбросов – использование систем вертикального озеленения для зданий, расположенных вблизи детских садов. Дальнейшее развитие предложенного подхода связано с построением более реалистичной трехмерной модели распространения вредных выбросов в городе, с учетом взаимовлияния агентов-выбросов с различными ландшафтными объектами (зелеными насаждениями, высотными зданиями и др.).

Remarks:

1. >>>>

References:

1. Akopov A.S., Beklaryan A.L., Sagatelyan A.K., Saakyan L.V., Belyaeva O.A., Tepyanosyan G.O. Sistema podderzhki prinyatiya reshenij dlya ratsional'nogo ozeleneniya goroda na primere g. Erevan, Respublika Armeniya // Programmnaya inzheneriya. 2019, T. 10, № 2.
2. Akopov A.S., Beklaryan, L.A., Saghatelyan, A.K. Agent-based modelling of interactions between air pollutants and greenery using a case study of Yerevan, Armenia // Environmental Modelling and Software. 2019, Vol. 116, Pp. 7-25.
3. Akopov A.S., Beklaryan A.L., Saghatelyan A.K., Sahakyan L.V. Control system for ecological modernization of enterprises (on the example of the Republic of Armenia) // Business Informatics. 2016, No. 2 (36). P. 71-78
4. Akopov, A.S., Beklaryan, L.A., Saghatelyan, A.K. Agent-based modelling for ecological economics: A case study of the Republic of Armenia // Ecological Modelling 2017. Vol. 346, 99–118.
5. Akopov, A.S., Beklaryan, L.A., Thakur, M., Verma, D.B. Parallel multi-agent real-coded genetic algorithm for large-scale black-box single-objective optimisation // Knowledge-Based Systems. 2019, Vol. 174, pp. 103-122.
6. Baldacchini C. et al. How Does the Amount and Composition of PM Deposited on Platanus acerifolia Leaves Change Across Different Cities in Europe? // Environmental Science & Technology. 2017. Vol. 51, no.3, pp. 1147-1156.
7. Brunekreef, B., Holgate, S.T. Air pollution and health // Lancet. 2002. Vol. 360 (9341), Pp. 1233-1242.
8. Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," in IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002. Vol. 6, No. 2, Pp. 182-197.
9. Fernandez-Canero, R., Urrestarazu L.P., Perini K. Vertical Greening Systems: Classifications, Plant Species, Substrates. Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability. 2018, Pp. 45-54.
10. Fuiii, S., Chaa H., Kagib K., Miyamura, H., Kim, Y. (2005). Effects on air pollutant removal by plant absorption and adsorption // Building Environment. Vol. 40, Pp. 105–112.
11. Maghakyan N., Tepanosyan G., Belyaeva O., Sahakyan L., Saghatelyan A. Assessment of pollution levels and human health risk of heavy metals in dust deposited on Yerevan's tree leaves (Armenia) // Acta Geochimica. 2017. Vol. 36, no. 1, 2017, pp. 16–26. DOI 10.1007/s11631-016-0122-6
12. Nesshover et al. The science, policy and practice of nature-based solutions: An interdisciplinary perspective // Science of The Total Environment. 2017. Vol. 579, pp. 1215–1227.
13. Turner, D.B. Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates: An Introduction to Dispersion

Modeling (2nd ed.). 1994.

14. Zitzler, Eckart & Laumanns, Marco & Thiele, Lothar. SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm. TIK-Report. 2001. Pp. 103.

Агентное моделирование сложной системы горизонтально-вертикального озеленения и вредных атмосферных выбросов на примере г. Ереван, Республика Армения

Акопов А. С.

ЦЭМИ РАН

Российская Федерация, Москва

Бекларян Л. А.

ЦЭМИ РАН

Российская Федерация, Москва

Сагателян А. К.

*Центр эколого-ноосферных исследований Национальной академии наук Республики
Армения*

Армения, Ереван

Беляева О.

*Центр эколого-ноосферных исследований Национальной академии наук Республики
Армения*

Армения, Ереван

Саакян Л.

*Центр эколого-ноосферных исследований Национальной академии наук Республики
Армения*

Армения, Ереван

Тепаносян Г.

*Центр эколого-ноосферных исследований Национальной академии наук Республики
Армения*

Армения, Ереван

Аннотация

В данной статье представлен новый подход к моделированию систем горизонтального и вертикального озеленения городских территории, взаимодействующих с вредными атмосферными выбросами на примере г. Ереван, Республика Армения. Особенностью данного подхода является комбинирование агент-ориентированной модели распространения вредных выбросов в городе с предложенной упрощенной Гауссовой моделью рассеивания вредных веществ в атмосфере. Разработана и реализована в AnyLogic новая агентная модель, учитывающая взаимовлияние систем горизонтально-вертикального озеленения и вредных выбросов, и позволяющая, в частности, управлять характеристиками подобной системы на индивидуальном уровне кластеров озеленения. Сформулирована и решена би-критериальная задача по минимизации усредненной среднесуточной концентрации вредных атмосферных выбросов и бюджета на озеленение.

Ключевые слова: озеленение города, агентное моделирование, AnyLogic, Армения, эколого-

экономические системы, атмосферные выбросы.

Дата публикации: 13.03.2020

Ссылка для цитирования:

Акопов А. С. , Бекларян Л. А. , Беляева О. , Саакян Л. , Сагателян А. К. , Тепаносян Г. Агентное моделирование сложной системы горизонтально-вертикального озеленения и вредных атмосферных выбросов на примере г. Ереван, Республика Армения // Искусственные общества. 2020. Т. 15. Выпуск 1 [Электронный ресурс]. Доступ для зарегистрированных пользователей. URL: <https://artsoc.jes.su/s207751800008317-7-1/> (дата обращения: 09.08.2020). DOI: 10.18254/S207751800008317-7

User code: 0; Download date: 09.08.2020; URL - <http://artsoc.jes.su/s207751800008317-7-1/> All right reserved.