

АГЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ ТОЛПЫ В УСЛОВИЯХ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ ФРОНТА ВЫХОДНОГО ПОТОКА

**БЕКЛАРЯН АРМЕН ЛЕВОНОВИЧ
ПРЕПОДАВАТЕЛЬ НИУ ВШЭ**

**НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ
Д.Т.Н., ДОЦЕНТ АКОПОВ А.С.**

ПЛАН ДОКЛАДА

1. Актуальность рассматриваемой задачи
 2. Постановка задачи
 3. Существующие подходы к задаче
 4. Описание Модели толпы
 5. Модифицированный алгоритм нечеткой кластеризации
 6. Результаты кластерного анализа
 7. Описание программного комплекса
 8. Уравнение «фронта выхода»
 9. Заключение
-

АКТУАЛЬНОСТЬ ЗАДАЧИ

- В результате пожара в ночном клубе «Хромая лошадь» (5 декабря 2009 года) погибло 156 человек и 64 человека получили тяжкий вред здоровью.
- Давка, произошедшая 22 ноября 2010 года в столице Камбоджи во время традиционного камбоджийского праздника – фестиваля воды, – повлекла за собой гибель 456 человек, ещё более пятисот получили ранения различной степени тяжести.

Последствия ЧС являются трудно прогнозируемыми, так как зависят от множества факторов.

Результаты работы могут быть рекомендованы для формулировки требований к строительным нормам помещений с целью снижения числа пострадавших при возникновении ЧС. Полученное уравнение “фронта” позволяет повысить эффективность процесса эвакуации с целью максимизации числа спасенных агентов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Толпа — бесструктурное скопление людей, лишенных ясно осознаваемой общности целей, но связанных между собой сходством эмоционального состояния и общим объектом внимания.

Цель исследования — разработка агентной модели поведения толпы для эффективной оценки интенсивности потока на фронте выхода с реализацией в виде программного комплекса.

Задачи исследования:

- Создание имитационной агентной модели поведения толпы, основанной на индивидуальной системе принятия решений агентов.
- Разработка модифицированного алгоритма нечеткой кластеризации, агрегированного с имитационной моделью поведения толпы.
- Проведение кластерного анализа с целью идентификации динамики возникающих кластеров.
- Выявление зависимости динамики людских таксонов (кластеров) от параметров модели.
- Синтез уравнения “фронта выхода” для модели поведения толпы.
- Проектирование комплекса программ для реализации агентной модели поведения толпы, агрегированной с предложенным модифицированным алгоритмом нечеткой кластеризации.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Объект исследования — динамика толпы в условии чрезвычайной ситуации, моделируемая с помощью программного комплекса.

Предмет исследования — имитационная модель поведения толпы для эффективной оценки интенсивности потока на фронте выхода.

Методы исследования: при выполнении диссертационной работы применялись методы: дискретной математики, теории вероятностей и математической статистики, численных методов, аналитической геометрии, дифференциальных уравнений, современных технологий программирования (ООП, Java, R) и имитационного моделирования (AnyLogic).

ПОДХОДЫ К ЗАДАЧЕ

Долгое время основные работы по данной теме были посвящены психологическим и социальным аспектам вопроса. То есть солидная часть исследователей рассматривала толпу с фрейдистской точки зрения, основанной на гипотезе, что люди как часть толпы действуют иначе, чем люди как индивиды. Совокупность разумов членов группы синергируются в некий коллективный разум. Соответственно, и предлагаемые решения проблемы возникновения паники также основаны на данном подходе, который мы назовем *наивным*.

Ключевые работы:

- *Г. Лебон*, Психология народов и масс. — 1895.
- *К.Г. Юнг*, Психология бессознательного. — 1912.
- *З. Фрейд*, Психология масс и анализ человеческого “Я”. — 1921.
- *A. Mintz*, Non-adaptive group behavior // *Journal of Abnormal Psychology*. — 1951.
- *Г.М. Андреева*, Социальная психология. — 1994.

ПОДХОДЫ К ЗАДАЧЕ

Изучение толпы с привлечением математических моделей сложных систем началось сравнительно недавно. Здесь стоит отметить пионера этой области — Дирка Хелбинга. В основе его работ лежала идея применения к толпе людей методов молекулярной динамики, где психологические и социальные факторы рассматриваются как потенциалы взаимодействия между молекулами-людьми. На основе модели Хелбинга были построены ряд других моделей рассматривающие различные аспекты возможных усложнений системы взаимодействий. Такой подход будем называть *молекулярным*.

Ключевые работы:

- *D. Helbing, Simulating dynamical features of escape panic // Nature. — 2000.*
- *D. Helbing, Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations // Pedestrian and evacuation dynamics. — 2002.*
- *А.М. Антуков, Моделирование поведения паникующей толпы в многоуровневом разветвленном помещении // Компьютерные исследования и моделирование. — 2013.*

ПОДХОДЫ К ЗАДАЧЕ

На ряду с двумя описанными подходами, в работах Бекларяна (ст)-Акопова был предложен *феноменологический* подход, в рамках которого формализована агентная модель поведения толпы. В такой агентной модели априори определяются состояния агентов с их характеристиками, правила взаимодействия агентов и правила принятия решений. Это позволяет смоделировать динамику состояния системы как результат взаимодействия автономных агентов, чья система принятия решений задается в явном виде, а не является результатом решения системы уравнений Ньютона.

Ключевые работы:

- *A.S. Akopov, L.A. Beklaryan, Simulation of human crowd behavior in extreme situations // International Journal of Pure and Applied Mathematics. — 2012.*
- *А.С. Акопов, Л.А. Бекларян, Агентная модель поведения толпы при чрезвычайных ситуациях // Автоматика и телемеханика.— 2015.*
- *G. Antonini, Discrete choice models of pedestrian walking behavior // Transportation Research Part B. — 2006.*

ТРЕБОВАНИЯ К МОДЕЛИ

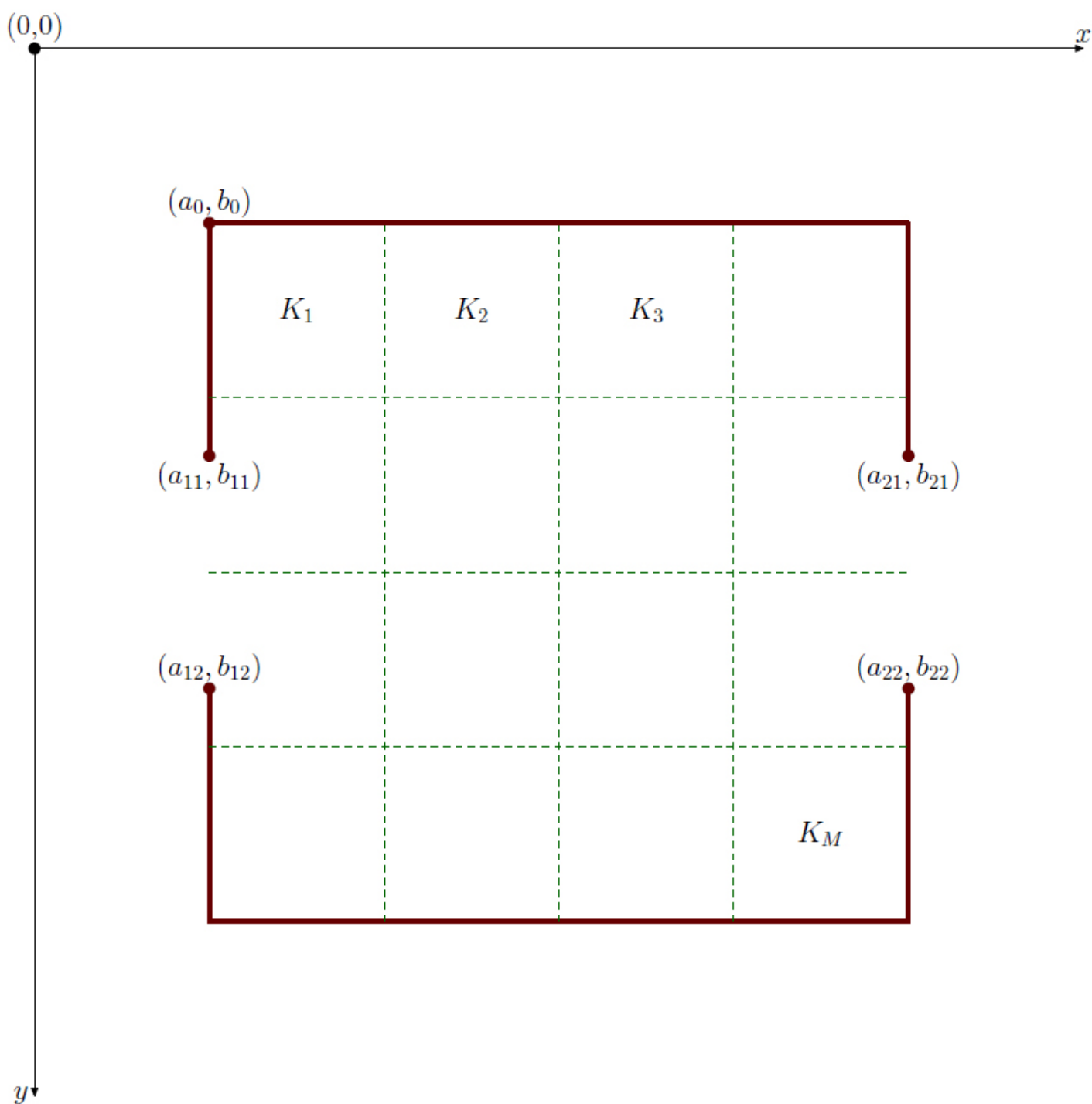
№	Требование	Модели Хелбинга	Дискретные модели	Имитационно-стохастическая модель движения людских потоков МЧС России	Источник
1	среднее время расчета одного сценария ЧС не более 10 мин.	–	+	+	[45] (свод правил МЧС)
2	моделирование фронта выхода	–	–	–	требования ЛПР*
3	расчет интенсивности выходного потока на фронте выхода	–	–	–	требования ЛПР*
4	учет пола/возраста агентов	+	+	+	[38] (методика МЧС)
5	наличие случайных препятствий	+	–	–	требования ЛПР*
6	учет влияния взрыва на поведение агентов	+	–	–	[88] (исследования социальных-психологов)
7	возможность изменения геометрии помещения	+	+	–	требования ЛПР*
8	учет эффекта “притяжения” толпы	–	–	+	[88]
9	учет эффекта “турбулентности” толпы	+	–	–	Видеозаписи Швейцарской высшей технической школы Цюриха
10	расчет плотности потока	+	–	+	[45]
11	наличие личного пространства агента	+	–	+	[50] (исследования психологов)
12	расчет для большого количества агентов	–	+	+	требования ЛПР*

13	прогнозирование количества эвакуированных агентов с точностью 95%	–	–	–	[45]
14	разная степень ранения агентов	–	–	–	[55] (федеральный закон РФ)
15	индивидуальное восприятие ситуации агентом	–	–	–	[7] (исследования социологов)
16	учет площади проекции агента	+	–	+	[38]
17	различное начальное распределение агентов	+	+	–	[45]
18	учет угла обзора агента	+	+	–	[67] (исследования физиков)
19	учет близости агента к стенам	+	+	–	[88]
20	учет скорости потока	+	+	+	[38]
21	учет направления потока	–	+	–	Видеозаписи Швейцарской высшей технической школы Цюриха
22	учет комфортной скорости агента	+	–	–	[88]
23	учет многочастичного взаимодействия	–	–	–	Видеозаписи Швейцарской высшей технической школы Цюриха
24	возможность конфигурирования и масштабирования модели	–	–	–	ЛПР*
25	параметризация модели для имитации различных условий реализации ЧС	–	–	–	ЛПР*

КОНЦЕПЦИЯ МОДЕЛИ

В предлагаемой модели реализуется концепция перехода от фиксированных значений ряда показателей, отражающих как геометрию помещения, так и физику процесса перемещения агентов, к представлению их в качестве управляющих параметров модели. В результате удастся построить гибкую, универсальную модель, позволяющую варьировать управляющими параметрами и, как следствие, калибровать модель с целью максимизации правдоподобия с реальными процессами.

Задано активное пространство прямоугольной формы с диаметрными выходами. Все пространство поделено на одинаковые области также прямоугольной формы, в каждой из которой задано свое распределение агентов по площади. Каждый агент характеризуется своим состоянием и правилами взаимодействия с другими агентами. При этом как состояние, так и правила перемещения каждого из агентов являются функциями от статуса ситуации, которая характеризует степень экстремальности обстановки в восприятии агента.



ГЕОМЕТРИЯ ПОМЕЩЕНИЯ

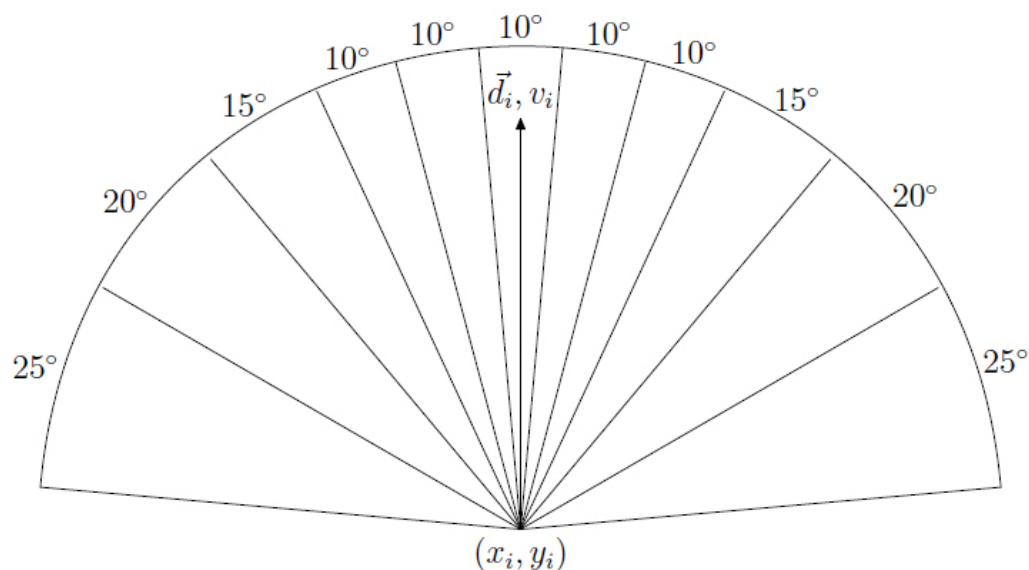
Координаты вершин углов помещения, растворов выходов, количество клеток разбиения – все характеристики являются параметрами модели.

o_i – возраст агента. Нормальное распределение в отрезке [6, 79];
 g_i – пол агента. Равномерное распределение;
 $v_{i,comf}$ – комфортная скорость ходьбы агента;
 $v_{i,max}$ – максимальная скорость ходьбы агента;
 $\tilde{v}_{i,max}$ – максимальная скорость бега агента;
 $s_i(t)$ – площадь горизонтальной проекции агента;
 $x_i(t)$ – абсцисса положения агента в момент времени t ;
 $y_i(t)$ – ордината положения агента в момент времени t ;
 $\vec{d}_i(t)$ – единичный вектор перемещения агента в момент времени t ;
 $\vec{D}_i(t)$ – единичный вектор агента к точке выхода в момент времени t ;
 $\rho_i(t)$ – плотность агентов в момент времени t ;
 $\delta_i(t)$ – радиус “личного пространства” агента в момент времени t ;
 $st_i(t)$ – статус агента в момент времени t ;
 $sit_i(t)$ – статус ситуации в момент времени t ;
 $L_{i,k}(t)$ – значения функционала принятия решения для k -ого сектора в момент времени t ;

ПОВЕДЕНИЕ АГЕНТОВ

Каждый агент в каждый момент времени обладает семейством характеристик. Часть из этих характеристик заданы согласно некоторому распределению (эндогенные характеристики), а другие вычисляются в процессе моделирования (экзогенные характеристики). Параметры, участвующие в вычислении экзогенных параметров задаются перед стартом моделирования.

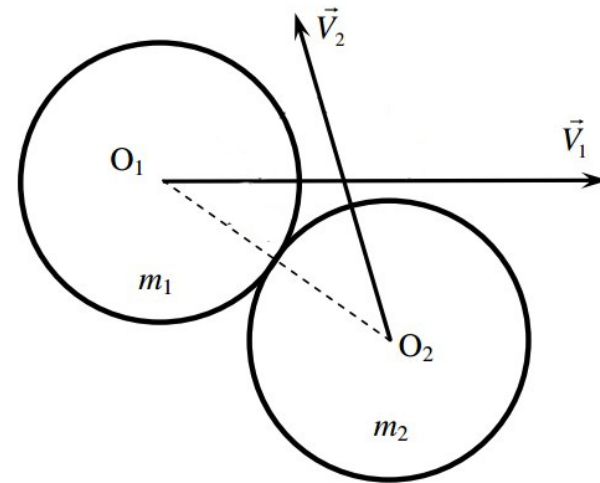
ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЯ АГЕНТОМ



$$\begin{aligned} \mathfrak{L}_i = & \beta_{occ}(sit_i(t))\mathbf{occupation}_i + \beta_{dir}(sit_i(t))\mathbf{direction}_i + \beta_{dest}(sit_i(t))\mathbf{destination}_i + \\ & \beta_{angle}(sit_i(t))\mathbf{angle}_i + \beta_{wall}(sit_i(t))\mathbf{wall}_i + \beta_{vel}(sit_i(t))(|v_{i,new} - v_{i,comf}|)^{\lambda_{vel}} + \\ & \beta_{max}(sit_i(t))(|v_{i,new} - \hat{v}_{i,max}|)^{\lambda_{max}} + \beta_{avg}(sit_i(t))(|v_{i,new} - v_{i,avg}|)^{\lambda_{avg}} + \\ & \beta_{expl}(sit_i(t))\mathbf{explosion}_i. \end{aligned}$$

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ ТОЛПЫ

$$\rho_i(t) = \frac{\sum_{j=1}^N \chi_i^j(t) s_j}{\eta^2 s_i}$$



$$\tilde{v}_i = \sqrt{\tilde{v}_{i,n}^2 + \tilde{v}_{i,\tau}^2}, \quad \tilde{v}_j = \sqrt{\tilde{v}_{j,n}^2 + \tilde{v}_{j,\tau}^2},$$

$$\tilde{v}_{i,\tau} = v_{i,\tau}, \quad \tilde{v}_{j,\tau} = v_{j,\tau},$$

$$\tilde{v}_{i,n} = \frac{(s_i - s_j)v_{i,n} + 2s_j v_{j,n}}{s_i + s_j}, \quad \tilde{v}_{j,n} = \frac{(s_j - s_i)v_{j,n} + 2s_i v_{i,n}}{s_i + s_j},$$

$$\tan \tilde{\alpha}_i = \frac{\tilde{v}_{i,\tau}}{\tilde{v}_{i,n}}, \quad \tan \tilde{\alpha}_j = \frac{\tilde{v}_{j,\tau}}{\tilde{v}_{j,n}},$$

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ ТОЛПЫ

$$\bar{s}_3 > \bar{s}_2 > \bar{s}_1 > \bar{s}_0,$$

$$\bar{\rho}_{1,i}(t) = \frac{\bar{\rho}_{3,i}(t)}{3}, \quad \bar{\rho}_{2,i}(t) = \frac{2\bar{\rho}_{3,i}(t)}{3},$$

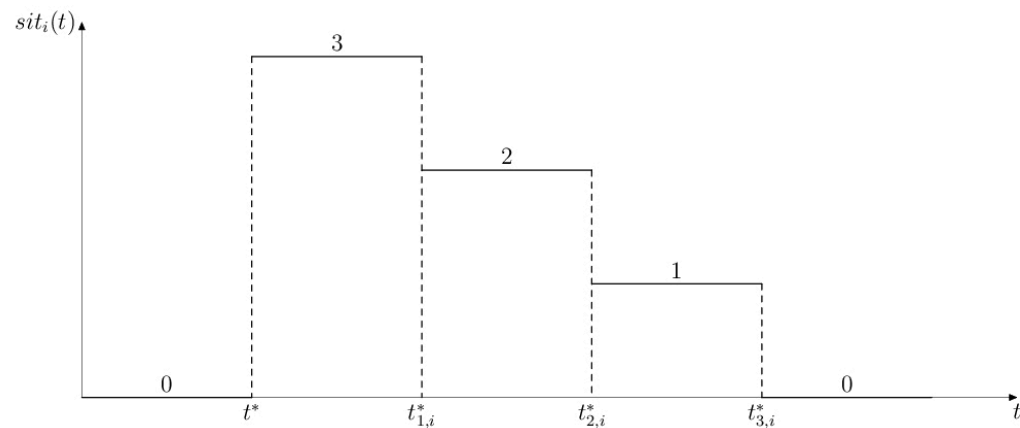
$$\bar{\rho}_{3,i}(t) = \varrho_3(sit_i(t)) \frac{s_i \sum_{j=1}^N \chi_i^j(t)}{\sum_{j=1}^N \chi_i^j(t) s_j}, \quad \bar{\rho}_{4,i}(t) = \varrho_4(sit_i(t)) \frac{s_i \sum_{j=1}^N \chi_i^j(t)}{\sum_{j=1}^N \chi_i^j(t) s_j}$$

$$\varrho_4(sit_i(t)) > \varrho_3(sit_i(t)), \quad \varrho_3(0) > \varrho_3(1) > \varrho_3(2) > \varrho_3(3), \quad \varrho_4(3) > \varrho_4(2) > \varrho_4(1) > \varrho_4(0),$$

$$\bar{\delta}_{1,i} = \vartheta_1 \sqrt{\frac{s_i}{\pi}}, \quad \bar{\delta}_{2,i} = \vartheta_2 \sqrt{\frac{s_i}{\pi}}, \quad \bar{\delta}_{3,i} = \vartheta_3 \sqrt{\frac{s_i}{\pi}}, \quad \bar{\delta}_{4,i} = \vartheta_4 \sqrt{\frac{s_i}{\pi}},$$

$$\vartheta_4 > \vartheta_1 > \vartheta_2 > \vartheta_3.$$

$$sit_i(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } 0 \leq t < t^* \text{ или } t \geq t_{3,i}^*; \\ 3, & \text{если } t^* \leq t < t_{1,i}^*; \\ 2, & \text{если } t_{1,i}^* \leq t < t_{2,i}^*; \\ 1, & \text{если } t_{2,i}^* \leq t < t_{3,i}^*; \end{cases}$$



$$\begin{cases} \pi \delta_i^2 v_i \vec{d}_i + s_j v_j \vec{d}_j = \pi \delta_i^2 \tilde{v}_i \vec{\tilde{d}}_i + s_j \tilde{v}_j \vec{\tilde{d}}_j, \\ \pi \delta_i^2 v_i^2 + s_j v_j^2 = \pi \delta_i^2 \tilde{v}_i^2 + s_j \tilde{v}_j^2, \\ \text{где } j = \arg \min_{j \in J} dist_{i,j}, \quad v_i = v_{i,max}, \\ J = \left\{ j \mid dist_{i,j} \leq \delta_i, \arccos \frac{(\vec{r}_j - \vec{r}_i, \vec{d}_i)}{\|\vec{r}_j - \vec{r}_i\|} \leq \frac{\hat{\theta}}{2} \right\}. \end{cases}$$

$$t_{1,i}^* = \begin{cases} 0, & \text{если } 0 \leq dist_{i,expl} \leq \varepsilon_0; \\ \infty, & \text{если } \varepsilon_0 < dist_{i,expl} \leq \varepsilon_1; \\ t^* + \kappa_1 e^{-(dist_{i,expl} - \varepsilon_1)}, & \text{если } dist_{i,expl} > \varepsilon_1. \end{cases}$$

$$\vec{\tilde{D}}_i = \sum_{j=1}^N I_{ij} \vec{d}_j e^{-\gamma_{exit} \|\vec{r}_{i,new} - \vec{r}_j\|},$$

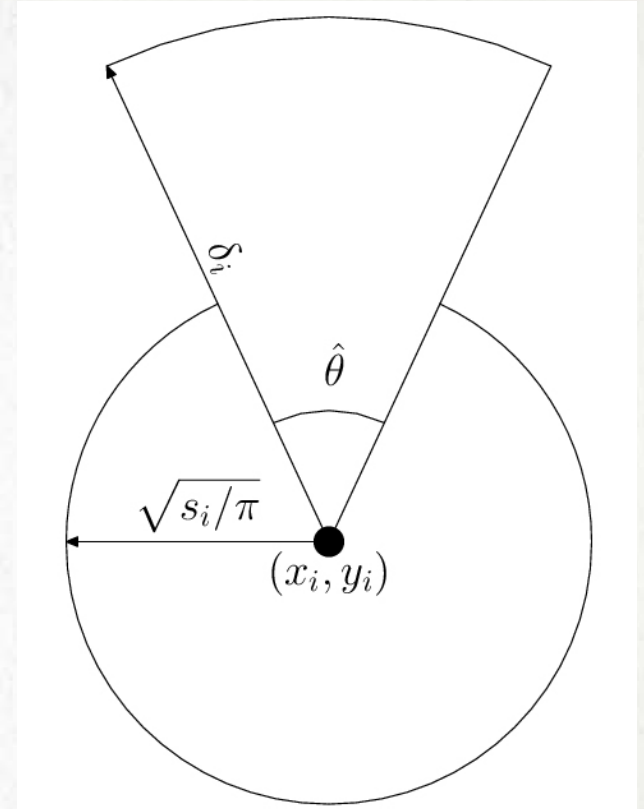
$$\vec{D}_i = \frac{\vec{\tilde{D}}_i}{\|\vec{\tilde{D}}_i\|}.$$

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ ТОЛПЫ

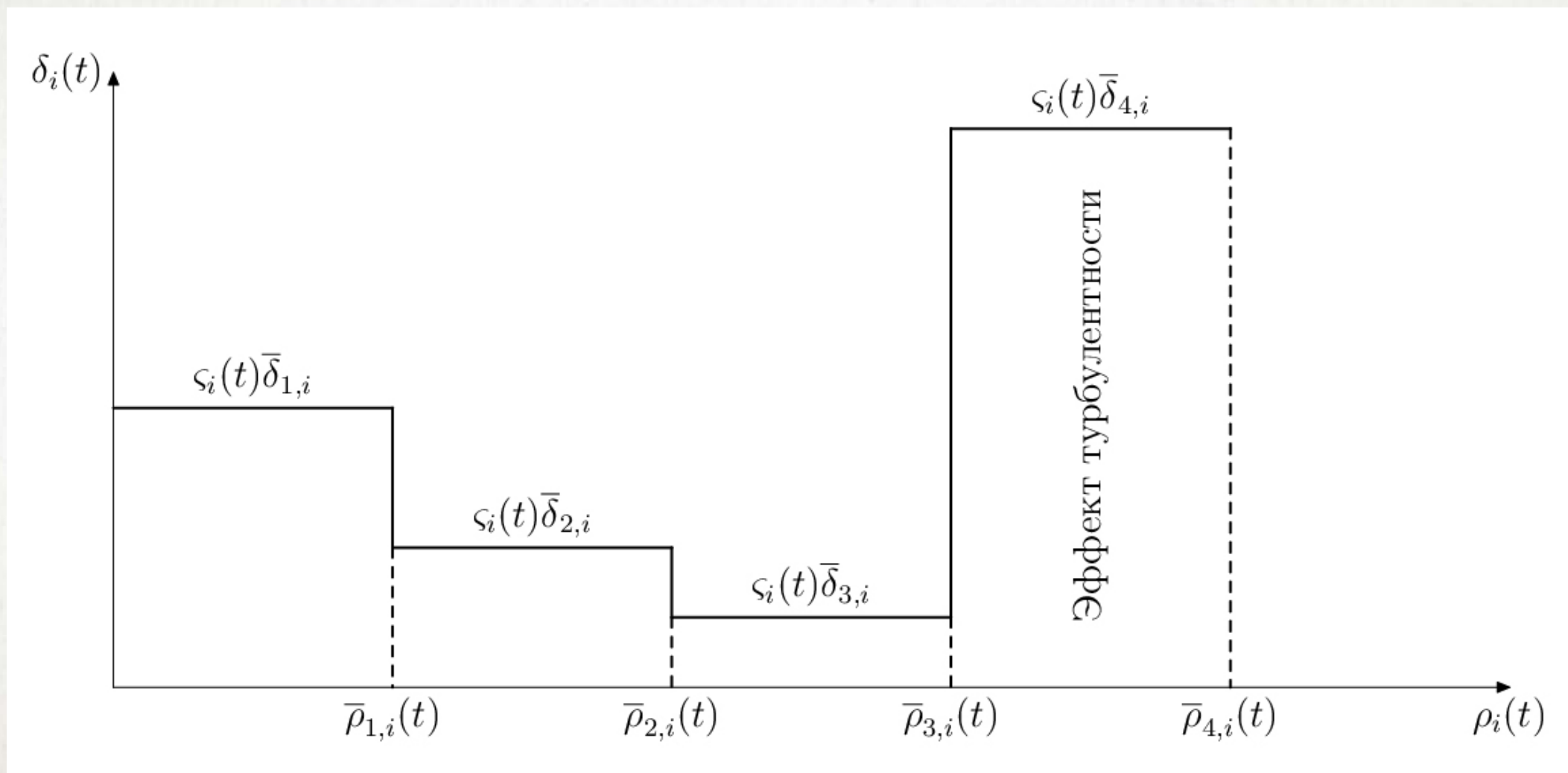
При сверхплотном скоплении вокруг агента у него начинается паника, что, в свою очередь, провоцирует возникновение эффекта турбулентности. Распространение турбулентности влечет появление волн сжатия, приводящих к давке и, как следствие, к смерти части агентов.

Процесс формирования волн сжатия описывается уравнением с решением типа бегущей волны. Одной из задач исследования является выявление условий как возникновения, так и разрушения волн сжатия.

В качестве инструментов влияния на данный процесс рассматриваются, например, внедрение интеллектуальных агентов-спасателей или серии препятствий, разряжающих толпу.



ТУРБУЛЕНТНОСТЬ ТОЛПЫ



РАЗРАБОТКА МОДИФИЦИРОВАННОГО АЛГОРИТМА НЕЧЕТКОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ (ОБЗОР МЕТОДОВ)

С целью выявления устойчивых групп агентов была проведена динамическая кластеризация. Применялись три параллельных алгоритма кластеризации:

1. Метод k-средних.
2. Иерархический метод.
3. Метод неточной кластеризации C-средних.

Для вычисления оптимального количества кластеров использовался критерий компактности:

$$S(U, K) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^N \mu_{ij}^2 |x_i - v_j|^2}{\min_{j,k} |v_j - v_k|^2}$$

$$K = \operatorname{argmin}_K \{ \min_{\Omega_K} S(U, K) \}$$

РАЗРАБОТКА МОДИФИЦИРОВАННОГО АЛГОРИТМА НЕЧЕТКОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ (ОБОСНОВАНИЕ)

С учетом высокой степени перестроения кластеров (распад имеющихся кластеров и соединения в новые), а также максимального «правдоподобия» был выбран алгоритм нечеткой кластеризации, **с целью дальнейшего перехода от динамики агентов к динамике кластеров и, как следствию, принципиальному снижению размерности задачи.**

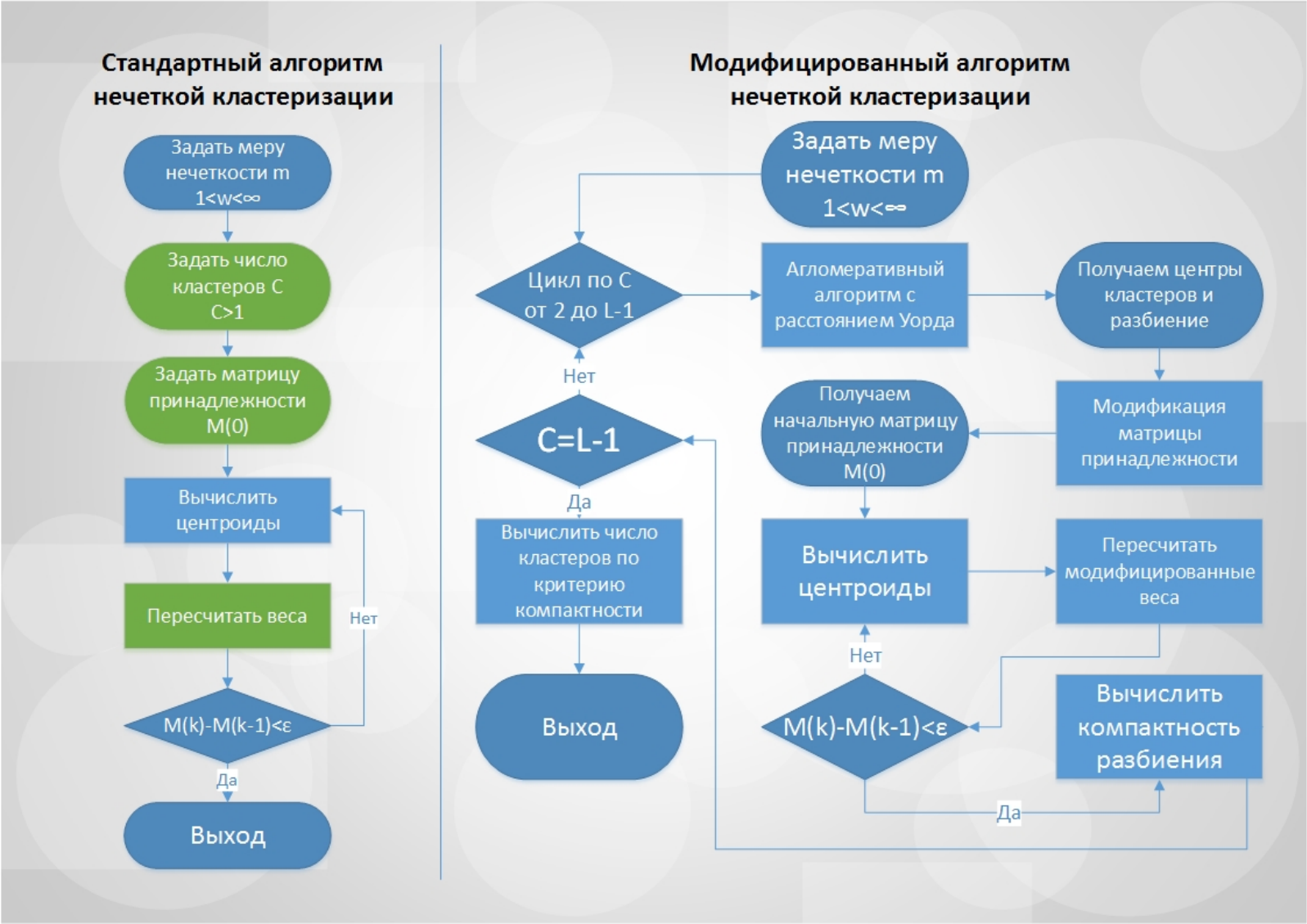
Среди исследуемых характеристик кластерного анализа отдельно стоит отметить:

- Динамика количества кластеров.
- Динамика центров кластеров.
- Динамика диаметров кластеров.
- Количество агентов кластера.

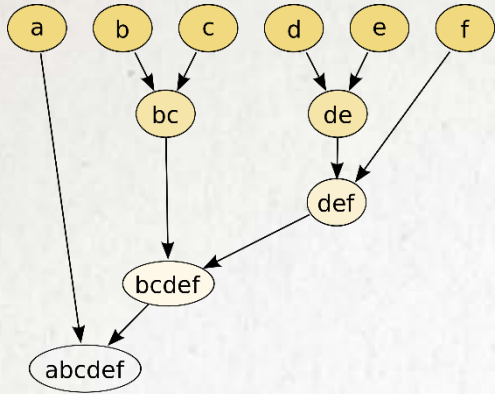
Также важно отразить предпочтения агента относительно различных кластеров:

- Мера принадлежности агента к кластеру.
- Частота выбытия и примыкания к кластеру.

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ НЕЧЕТКОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ



МОДИФИЦИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ НЕЧЕТКОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ



Расстояние Уорда (монотонное, растягивающее, редуктивное)

$$R(W, S) = \frac{|S||W|}{|S| + |W|} \rho^2 \left(\sum_{w \in W} \frac{w}{|W|}, \sum_{s \in S} \frac{s}{|S|} \right)$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{преобразование}} \begin{pmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \mu_{13} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \mu_{23} \\ \mu_{31} & \mu_{32} & \mu_{33} \end{pmatrix}$$

$$\mu_{ij} = \frac{\mu_{ij}^0 + \frac{\frac{A+1}{\alpha_{ij}} - 1 + \frac{\rho_{ic}}{\rho_{ij}}}{A + \frac{1}{\pi}}}{\sum_{j=1}^K \mu_{ij}^0 + \frac{\frac{A+1}{\alpha_{ij}} - 1 + \frac{\rho_{ic}}{\rho_{ij}}}{A + \frac{1}{\pi}}},$$

где A – коэффициент компенсации, α_{ij} – угол между d_i и направлением к центру кластера

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ НЕЧЕТКОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

Критерий разброса: $L = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^N \mu_{ij}^m e^{B \frac{\alpha_{ij}}{\pi}} d^2(x_i, v_j) \rightarrow \min$

Координаты центров кластеров: $v_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_{ij}^m e^{B \frac{\alpha_{ij}}{\pi}} x_{ik}}{\sum_{i=1}^N \mu_{ij}^m e^{B \frac{\alpha_{ij}}{\pi}}}$

Матрица принадлежности: $\mu_{ij} = \frac{1}{\left(d^2(x_i, v_j) e^{B \frac{\alpha_{ij}}{\pi}}\right)^{\frac{1}{m-1}} \sum_{k=1}^K \frac{1}{\left(d^2(x_i, v_k) e^{B \frac{\alpha_{ik}}{\pi}}\right)^{\frac{1}{m-1}}}}$ при $d(x_i, v_j) > 0$

$$\mu_{ik} = \begin{cases} 1, k = i \\ 0, k \neq i \end{cases} \text{ при } d(x_i, v_j) = 0$$

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ НЕЧЕТКОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ (ПРОБЛЕМА ВЫБОРА K)

Индексные методы:

1. Максимум индекса Галинского-Харабаша

$$CH_k = \frac{\text{trace}(B_k)(n - k)}{\text{trace}(W_k)(k - 1)}$$

B_k, W_k – матрицы междукластерных и внутрикластерных сумм квадратов расстояний

$$B_k = \sum_{i=1}^k \sum_{x \notin C_i} (x - c_i)(x - c_i)^T$$

$$W_k = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} (x - c_i)(x - c_i)^T$$

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ НЕЧЕТКОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ (ПРОБЛЕМА ВЫБОРА K)

2. Максимум индекса Krzanowski-Lai

$$KL_k = \left| \frac{Diff_k}{Diff_{k+1}} \right|$$
$$Diff_k = (k-1)^{2/p} W_{k-1} - k^{2/p} W_k$$

Основная идея в измерении порядка изменчивости внутренних дисперсий.

3. Наименьшее k, чтобы индекс Hartigan был меньше или равен 10

$$H_k = (n - k - 1) \left(\frac{W_k}{W_{k+1}} - 1 \right)$$

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ НЕЧЕТКОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ (ПРОБЛЕМА ВЫБОРА K)

Нечеткие методы:

1. Коэффициент разбиения

$$F(U, K) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^N \mu_{ij}^2$$

$$K = \operatorname{argmax}_K \left\{ \max_{\Omega_K} F(U, K) \right\}$$

2. Энтропия разбиения

$$H(U, K) = -\frac{1}{n} \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^N \mu_{ij} \log(\mu_{ij})$$

$$K = \operatorname{argmin}_K \left\{ \min_{\Omega_K} H(U, K) \right\}$$

СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

	Иерархический	k-means	Fuzzy C-means	Modified Fuzzy C-means
Частота смены кластера	6,3	4,2	1,8	1,4
Компактность	2,8	2,3	1,3	1,1
Период двух кластеров	2,7	3,1	1,7	1,5

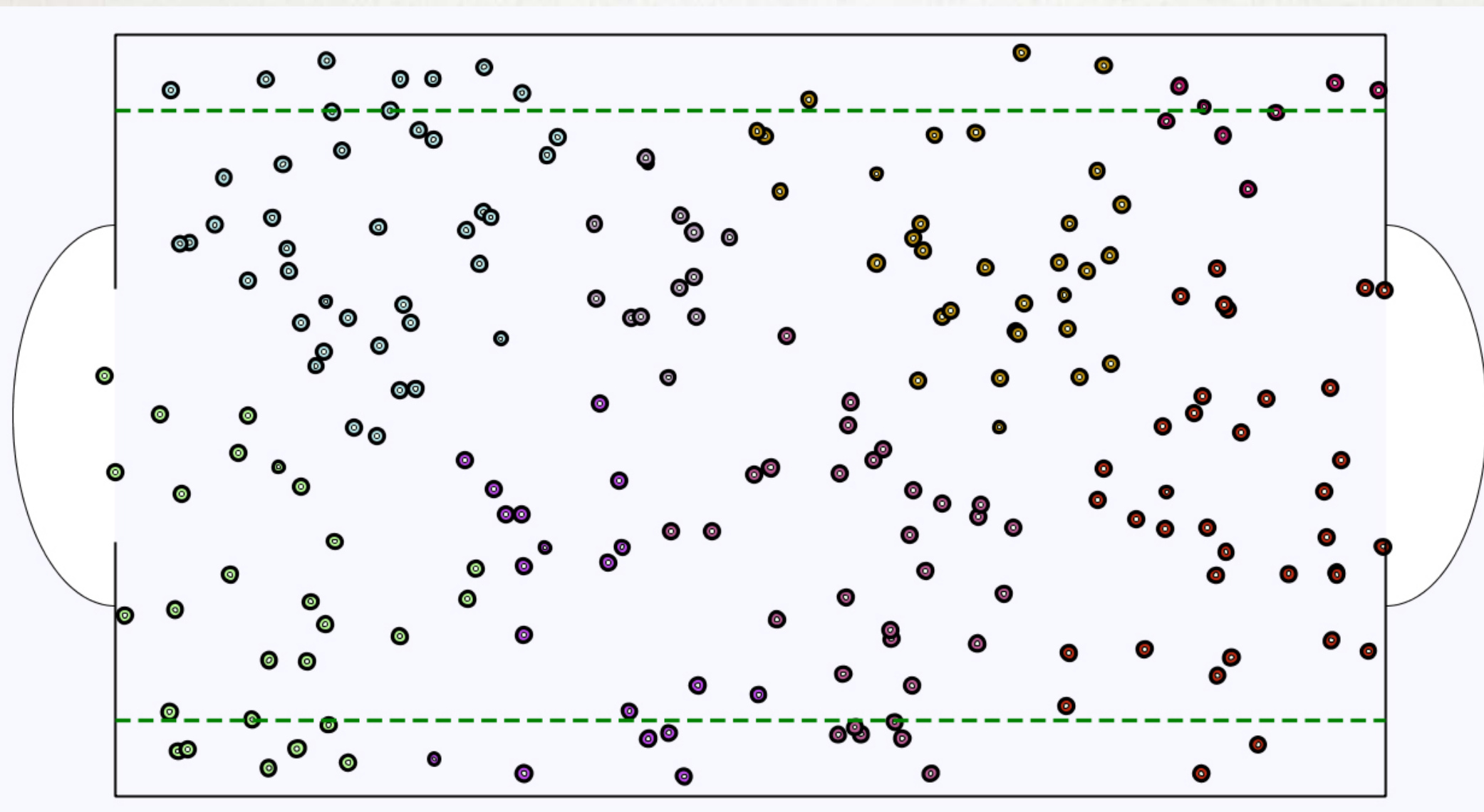
Частота смены кластера – общее число смены кластера каждым агентом за весь период симуляции. Для нечетких алгоритмов считается смена основного кластера с порогом 0,6.

Компактность – среднее значение компактности за весь период симуляции.

Период двух кластеров – отношение времени симуляции, в течение которого алгоритм определял два кластера, к общему времени симуляции

Каждая оценка выражена относительным значением: значения каждого критерия нормировались относительно наименьшего, а затем усреднялись по числу прогонов.

РЕЗУЛЬТАТЫ КЛАСТЕРИЗАЦИИ НА УРОВНЕ АГЕНТОВ



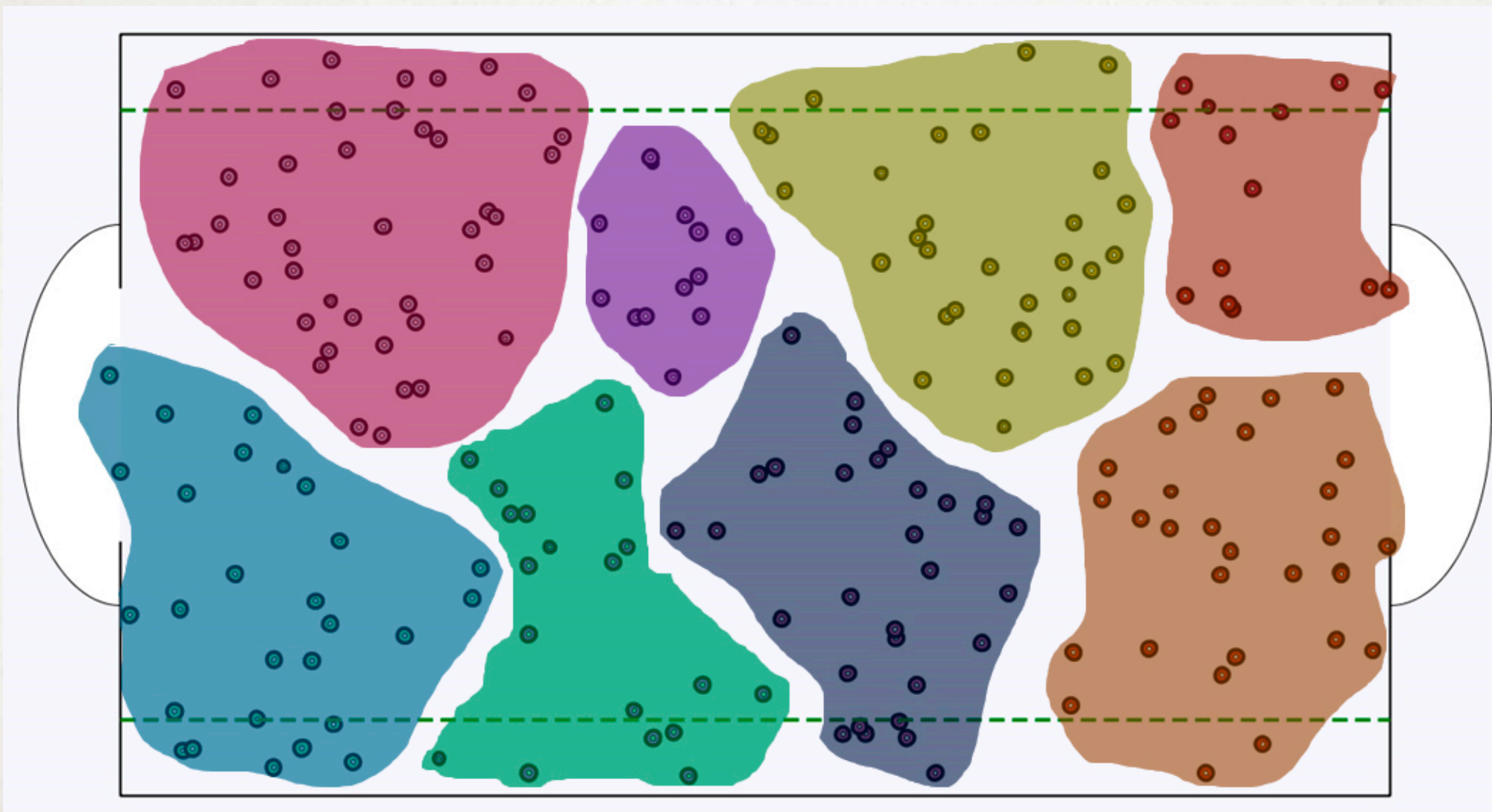
$l_{\text{шир}} = 110 \text{ м}$

$l_{\text{дл}} = 65 \text{ м}$

$N = 150 \text{ чел}$

$T_{\text{сим}} = 40 \text{ мин}$

ПЕРЕХОД К ДИНАМИКЕ КЛАСТЕРОВ



$$l_{\text{шир}} = 110 \text{ м}$$

$$l_{\text{дл}} = 65 \text{ м}$$

$$N = 150 \text{ чел}$$

$$n_{\text{прог}} = 20$$

$$T_{\text{сим}} = 8 \text{ мин}$$

РЕЗУЛЬТАТЫ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

Получены следующие результаты:

Утверждение 1 [1-2]. *Начальное количество кластеров является функцией количества агентов и начального распределения агентов, но не зависит от конфигурации активного пространства.*

Методы: Тест Грэнджера на причинность, проверка гипотезы F-тестом, $n=68$, $\alpha = 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

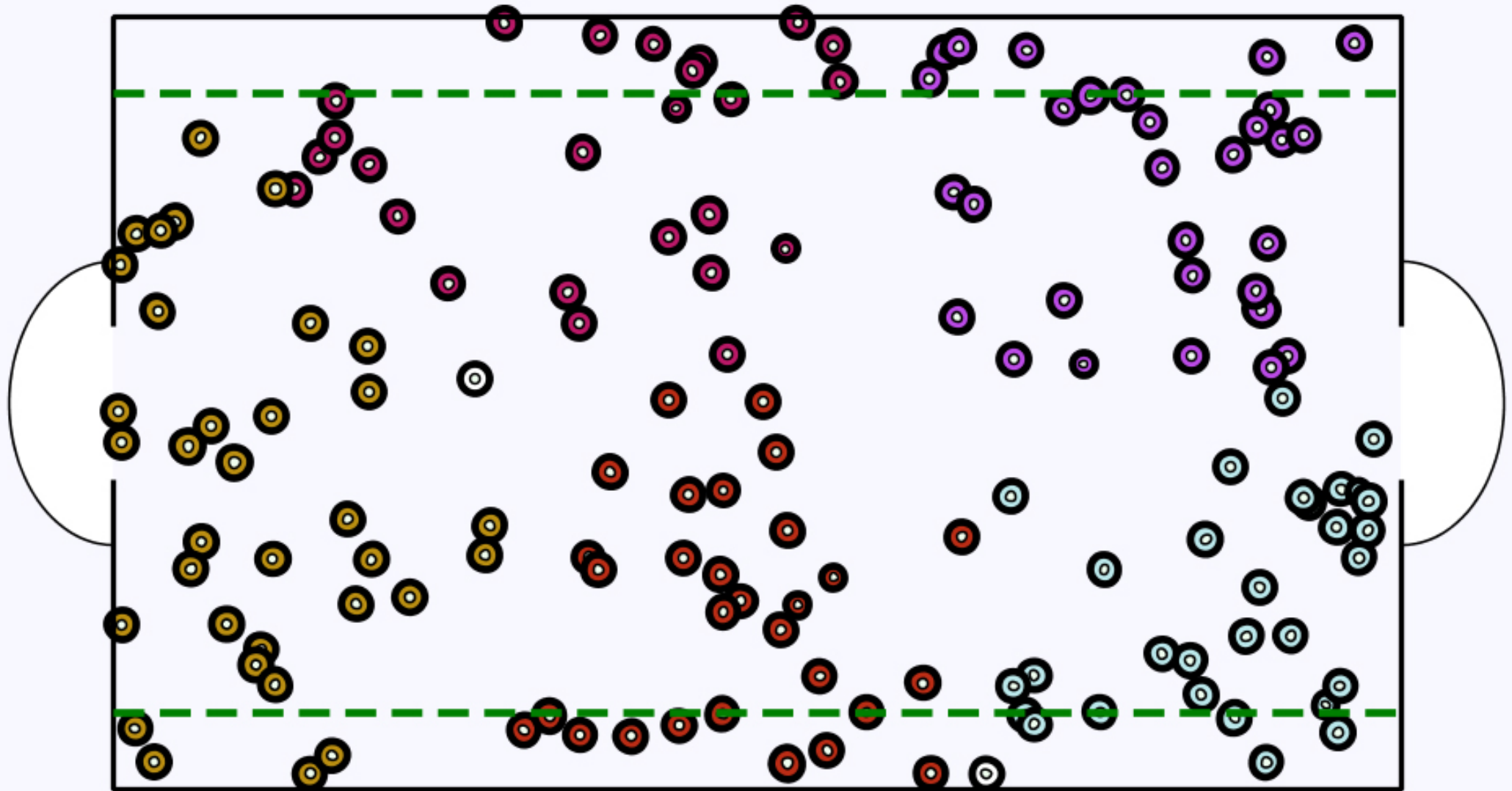
Утверждение 2 [1-2]. Методы: t-критерий Стьюдента, $n=30$, $k=15$, $\alpha = 0,05$. Динамика количества кластеров есть марковский процесс по отношению к параметрам взаимодействия агентов. Существуют моменты времени t^*, t^{**} , зависящие от количества агентов, конфигурации активного пространства и начальных распределений такие, что для $t^* < t < t^{**}$ количество кластеров стационарно. С момента t^{**} количество кластеров уменьшается до двух.



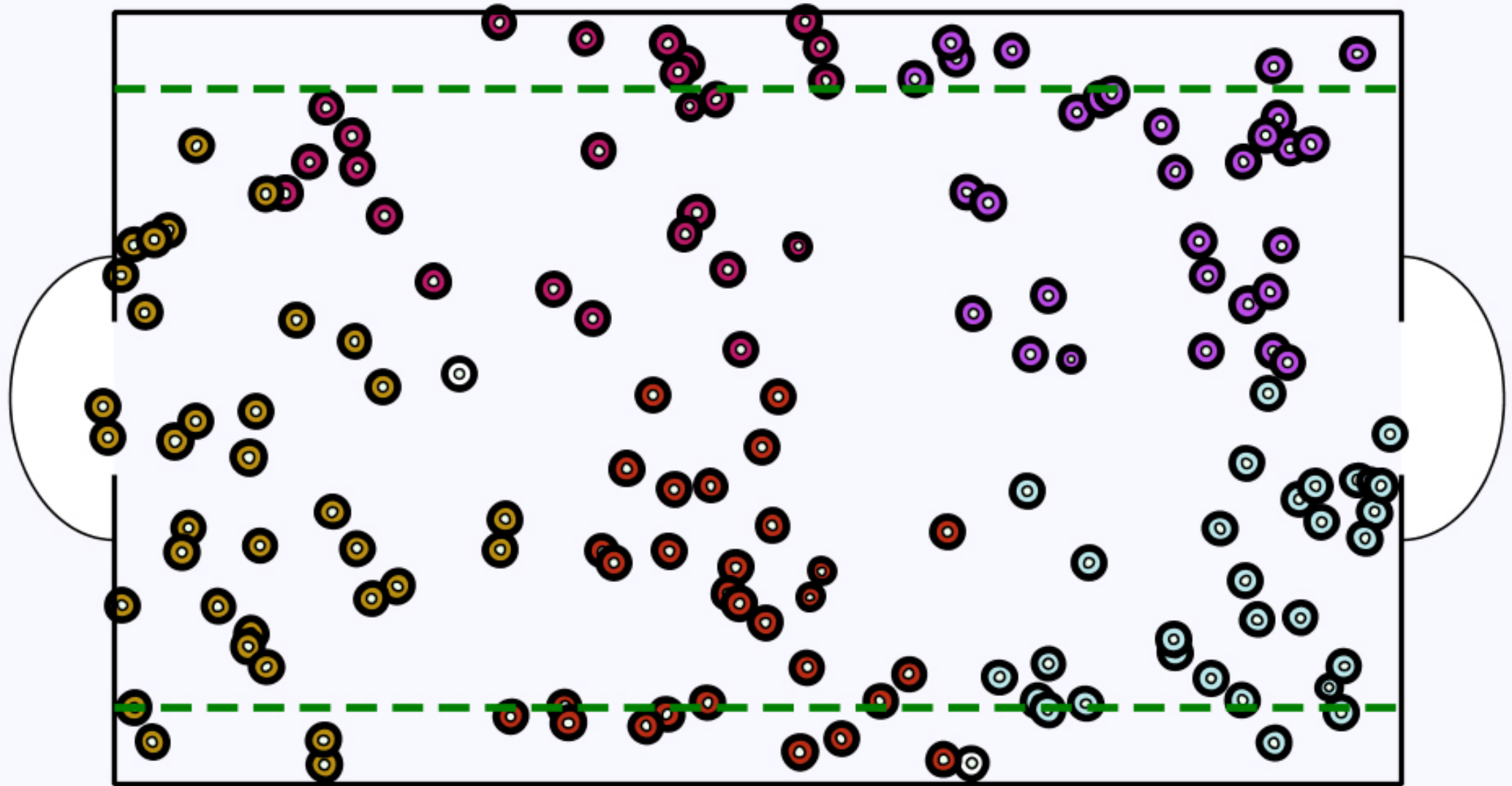
РЕЗУЛЬТАТЫ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

Утверждение 3 [1-2]. *С момента t^* сумма диаметров кластеров является убывающей функцией по времени.*

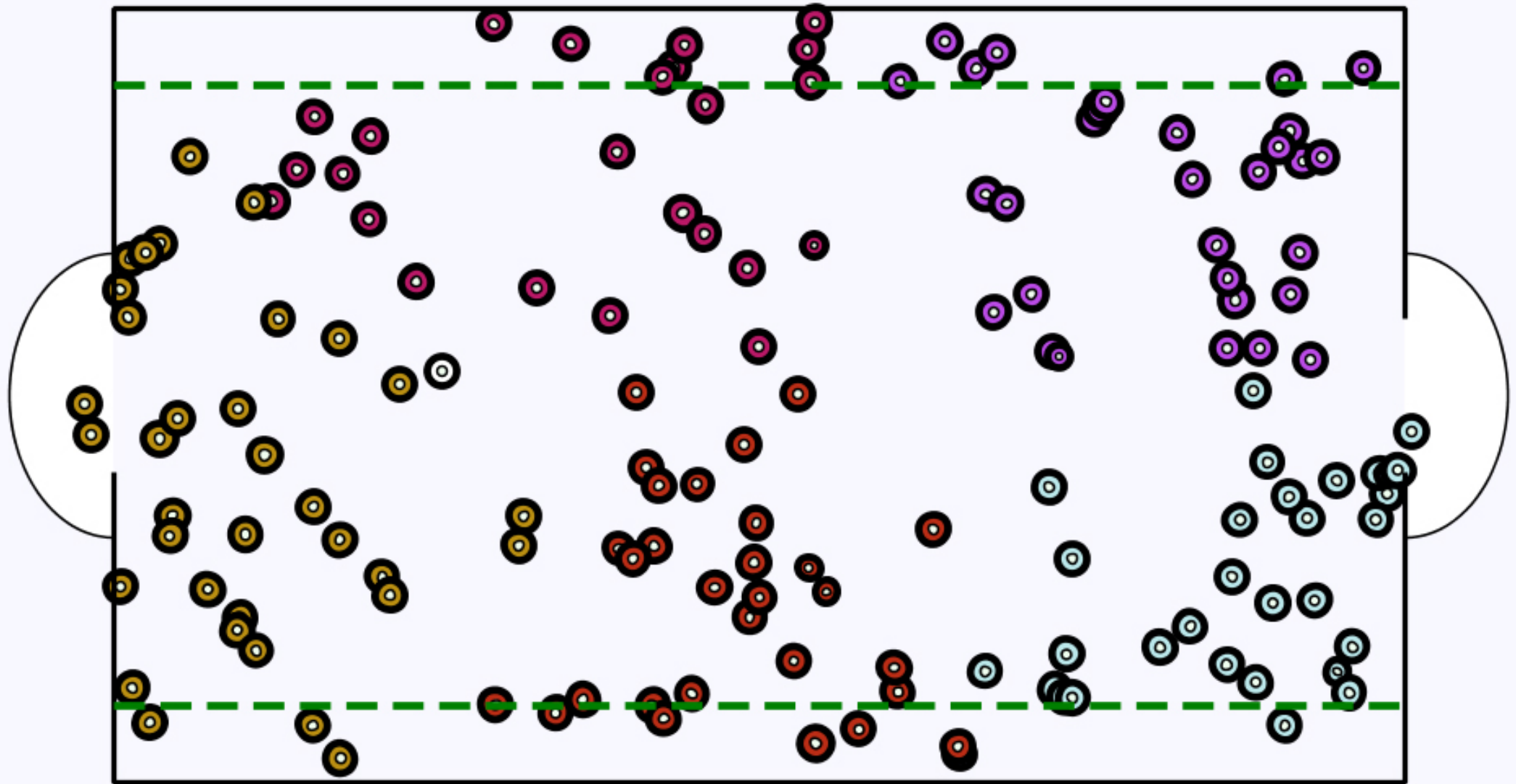
ДИНАМИКА ТОЛПЫ



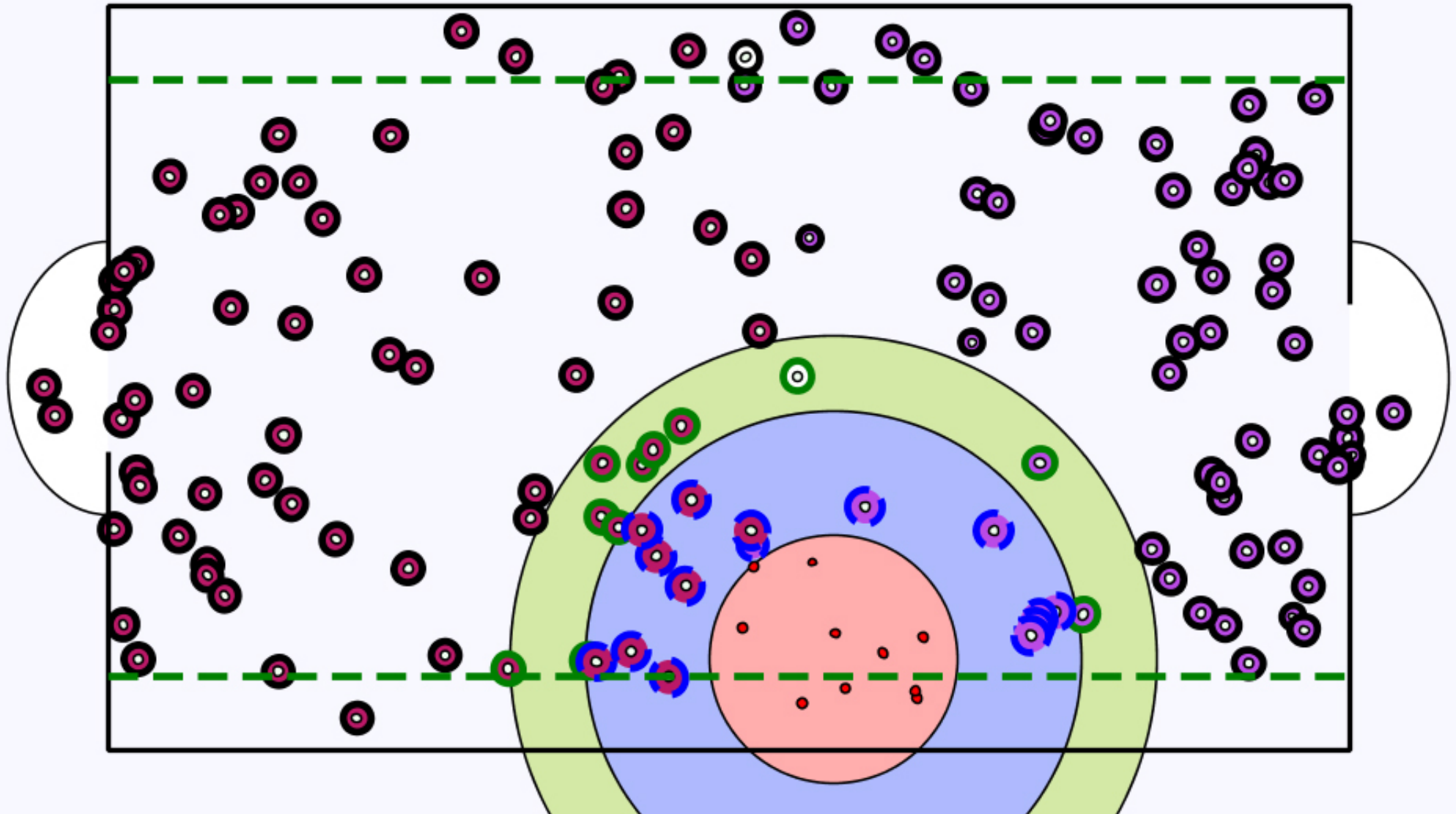
ДИНАМИКА ТОЛПЫ



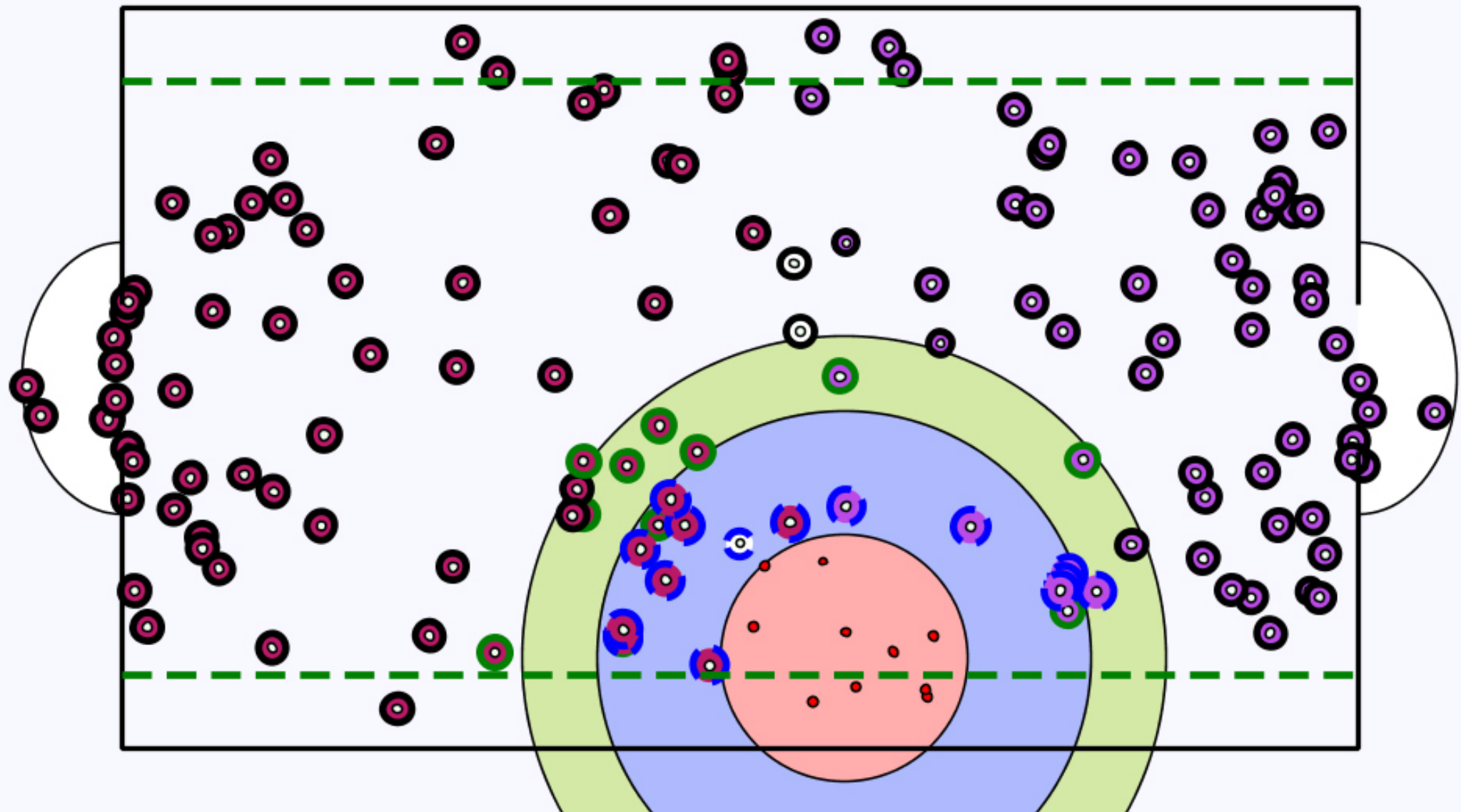
ДИНАМИКА ТОЛПЫ



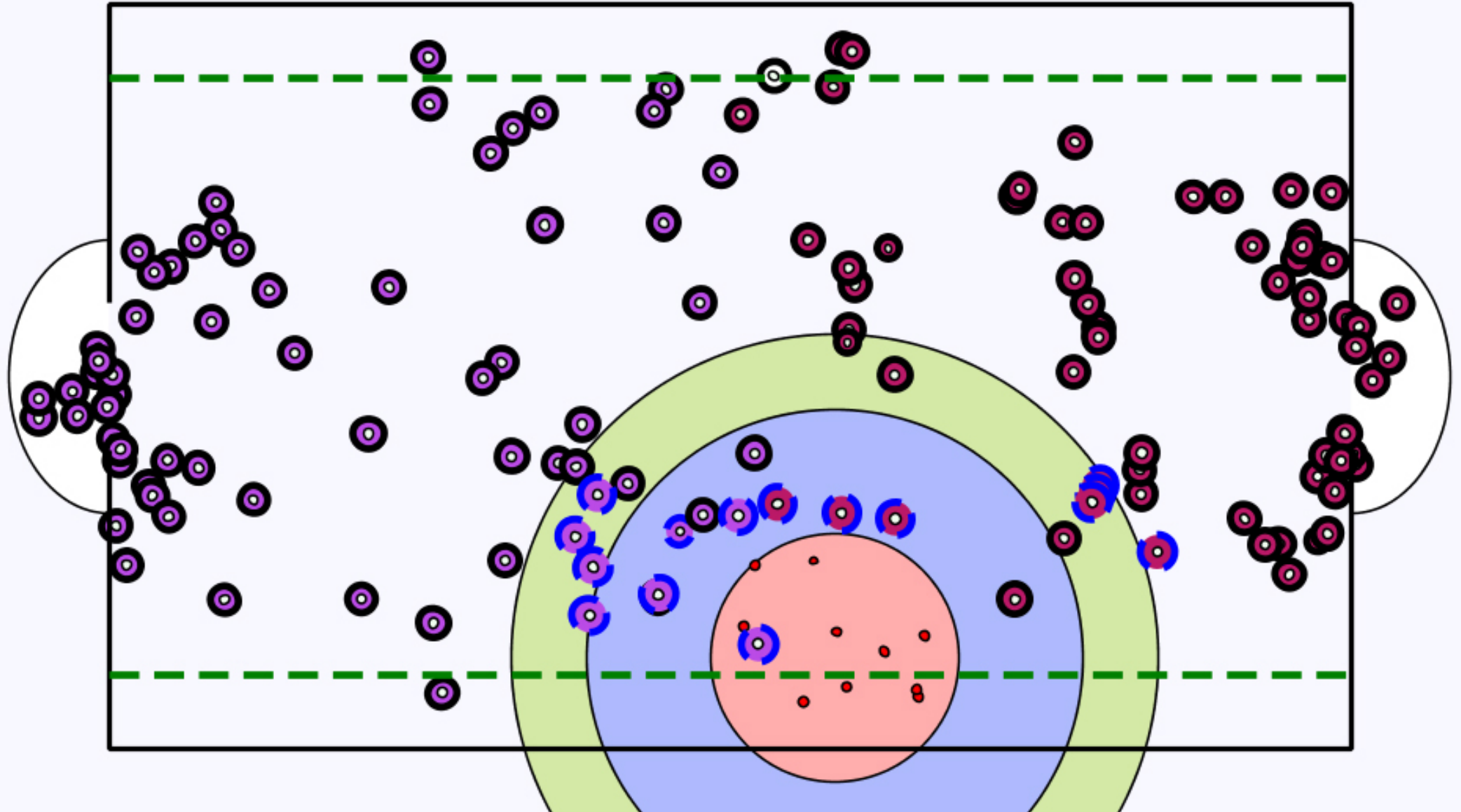
ДИНАМИКА ТОЛПЫ



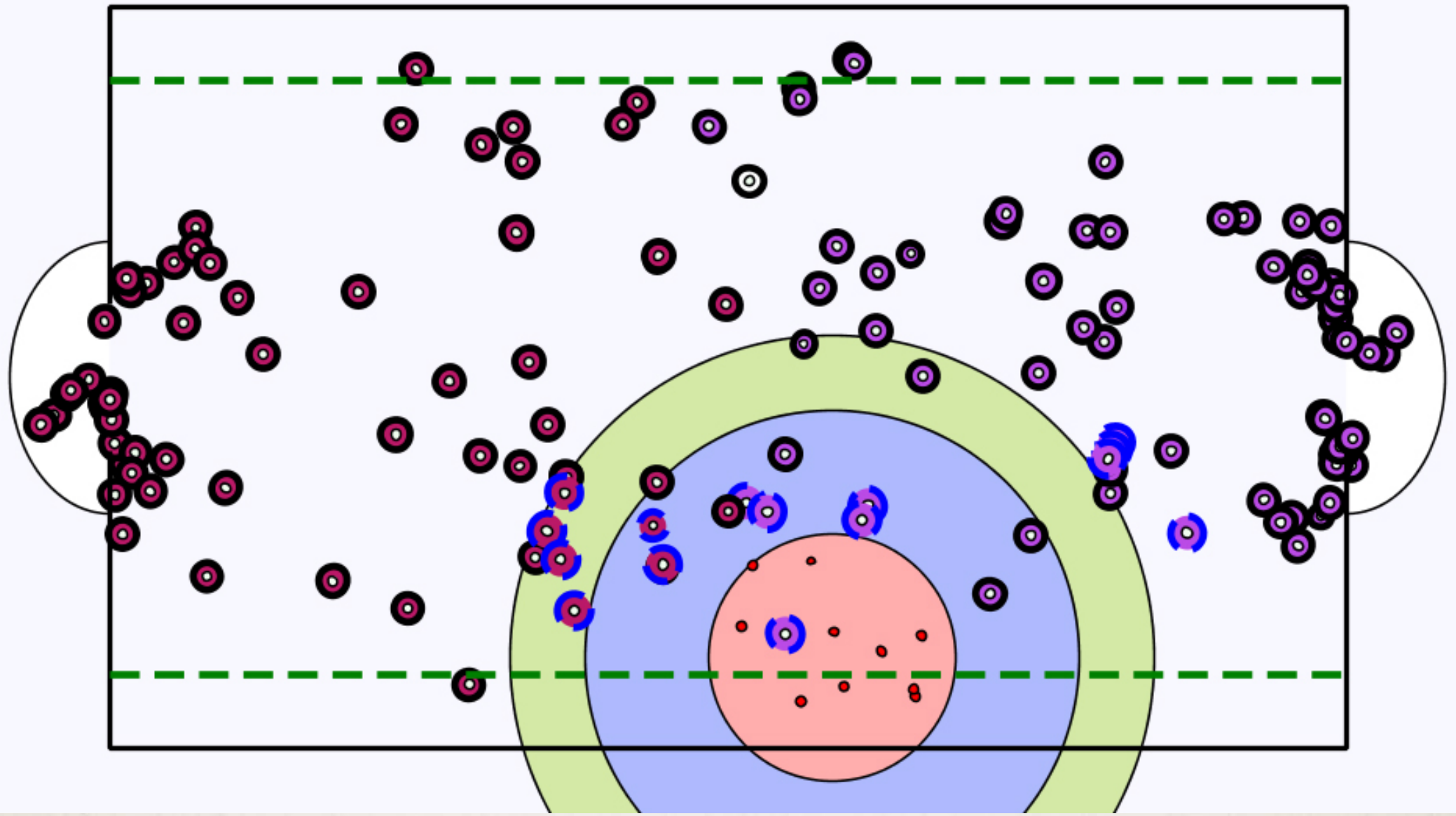
ДИНАМИКА ТОЛПЫ



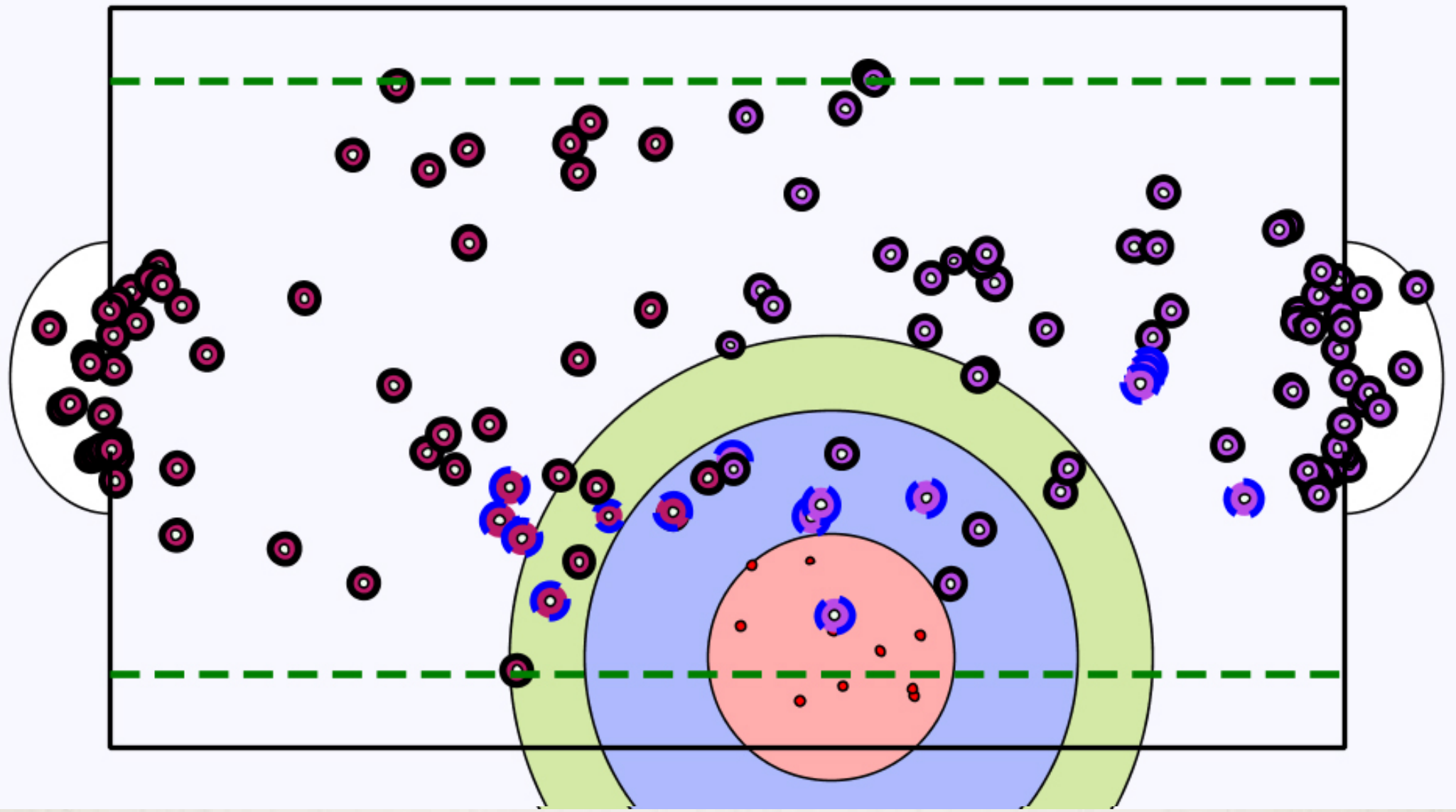
ДИНАМИКА ТОЛПЫ



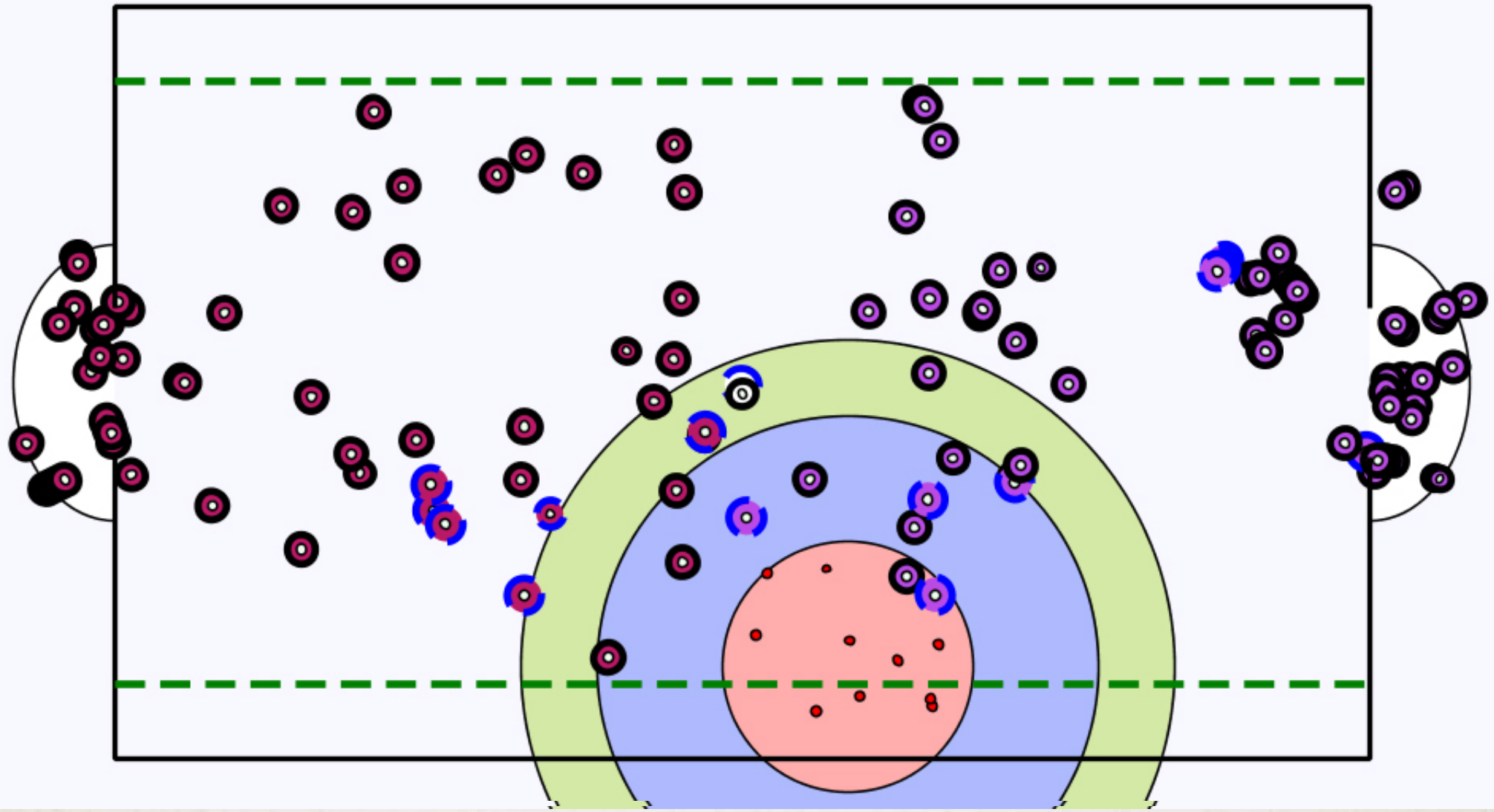
ДИНАМИКА ТОЛПЫ



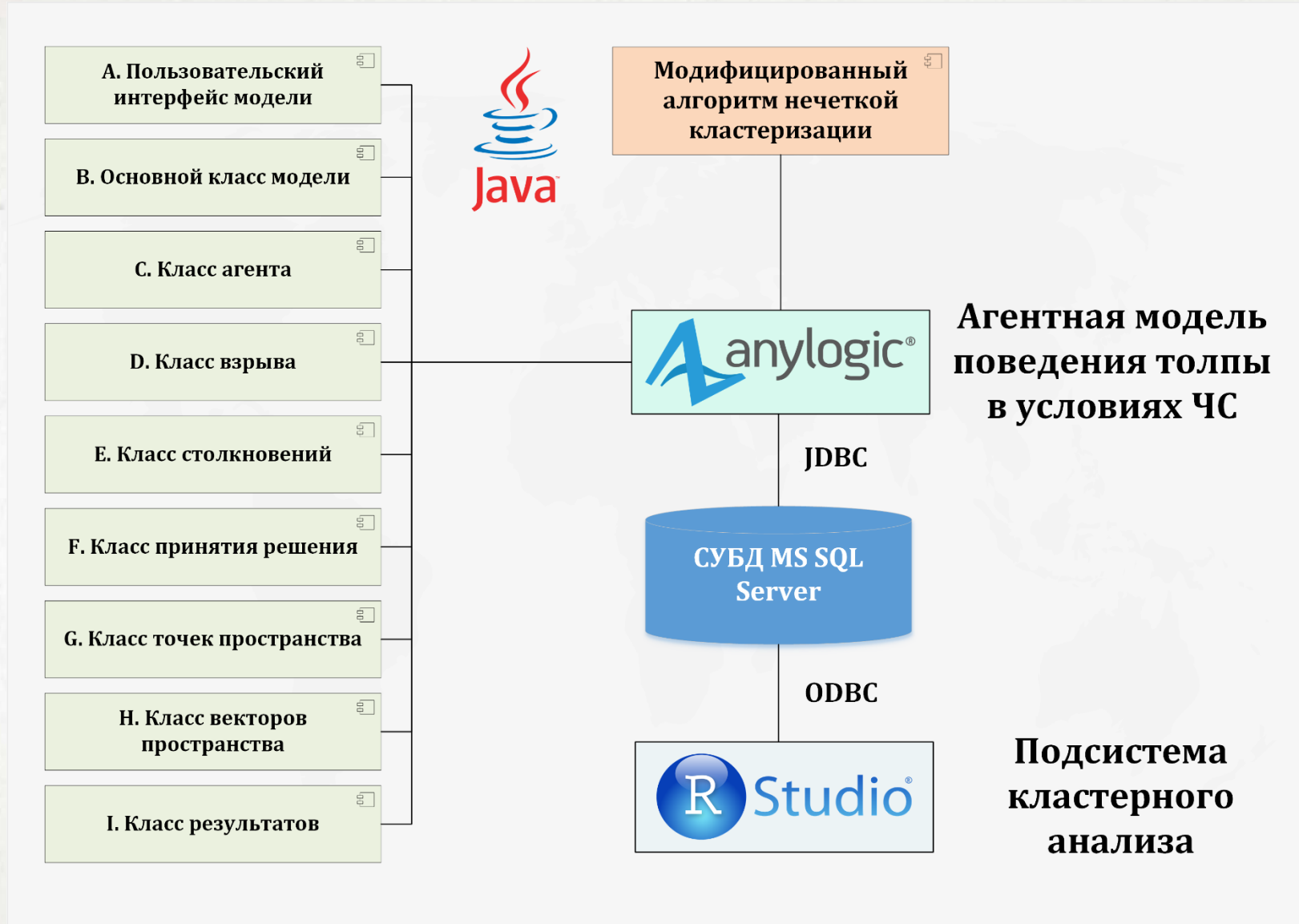
ДИНАМИКА ТОЛПЫ



ДИНАМИКА ТОЛПЫ

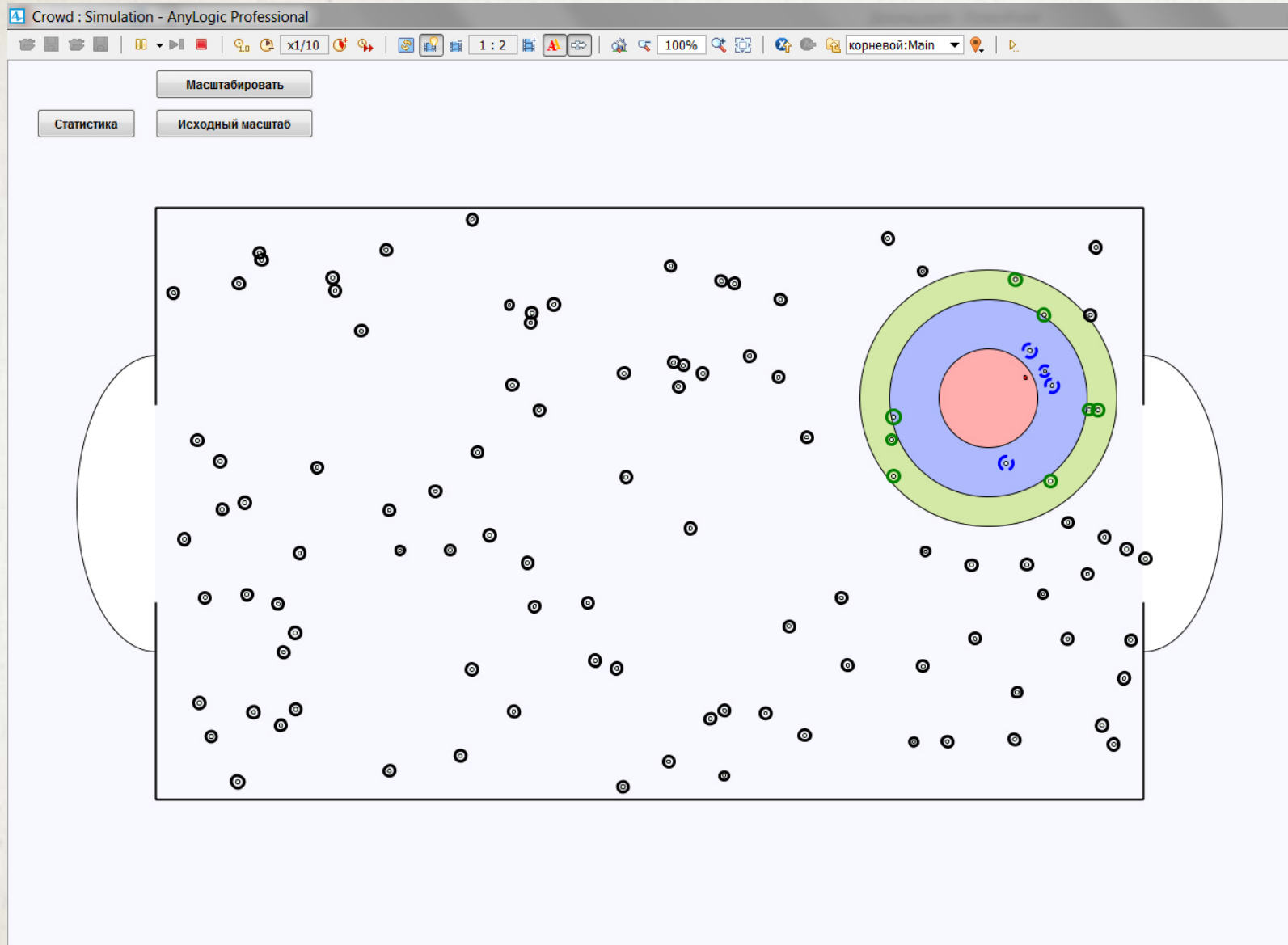


АРХИТЕКТУРА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА



ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС

Агентная модель была реализована в системе имитационного моделирования AnyLogic. Несмотря на встроенную в AnyLogic библиотеку пешеходов со своей логикой движения агентов, был разработан новый тип агента, чья система принятия решений основана на описанном ранее подходе. С целью хранения входных параметров агентной модели, задаваемых пользователем, а также для хранения динамики характеристик агентов в процессе моделирования, была разработана база данных под управлением СУБД MS SQL Server.



УСТАНОВКА ПАРАМЕТРОВ В МОДЕЛИ

Модель поведения толпы

Запустить

Версия прогона

1

Очистить БД

Количество агентов

265

Длина помещения 100.0
Ширина помещения 60.0
Координаты угла 15.0 15.0
Верх левого выхода 15.0 35.0
Низ левого выхода 15.0 55.0
Верх правого выхода 115.0 35.0
Низ правого выхода 115.0 55.0

Клетки по вертикали 1
Клетки по горизонтали 1

Распределение в клетке
Равномерное распределение
Равномерное распределение
Нормальное распределение
Треугольное распределение
Распределение Лапласа

Распределение взрыва
Равномерное распределение

Распределение турбулентности
Равномерное распределение

Распределение выхода
Равномерное распределение

- ☒ Распределить число агентов равномерно по клеткам
☐ Задать распределение числа агентов по клеткам

Параметр sigma_1 1.1
Параметр sigma_2 1.1
Параметр eta 5.0
Параметр varsigma_0 1.0
Параметр varsigma_1 1.05
Параметр varsigma_2 1.1
Параметр varsigma_3 1.15
Параметр varrho_3_0 0.83
Параметр varrho_3_1 0.82
Параметр varrho_3_2 0.81
Параметр varrho_3_3 0.8
Параметр varrho_4_0 0.9
Параметр varrho_4_1 0.91
Параметр varrho_4_2 0.92
Параметр varrho_4_3 0.93
Параметр vartheta_1 3.0
Параметр vartheta_2 2.0
Параметр vartheta_3 1.0
Параметр vartheta_4 4.0
Параметр theta_0 170
Параметр theta_1 170
Параметр theta_2 120
Параметр theta_3 80
Параметр theta_hat_0 50
Параметр theta_hat_1 50
Параметр theta_hat_2 30
Параметр theta_hat_3 30
Параметр gamma_acc 0.5
Параметр gamma_dec 0.5
Параметр gamma_exit 0.5

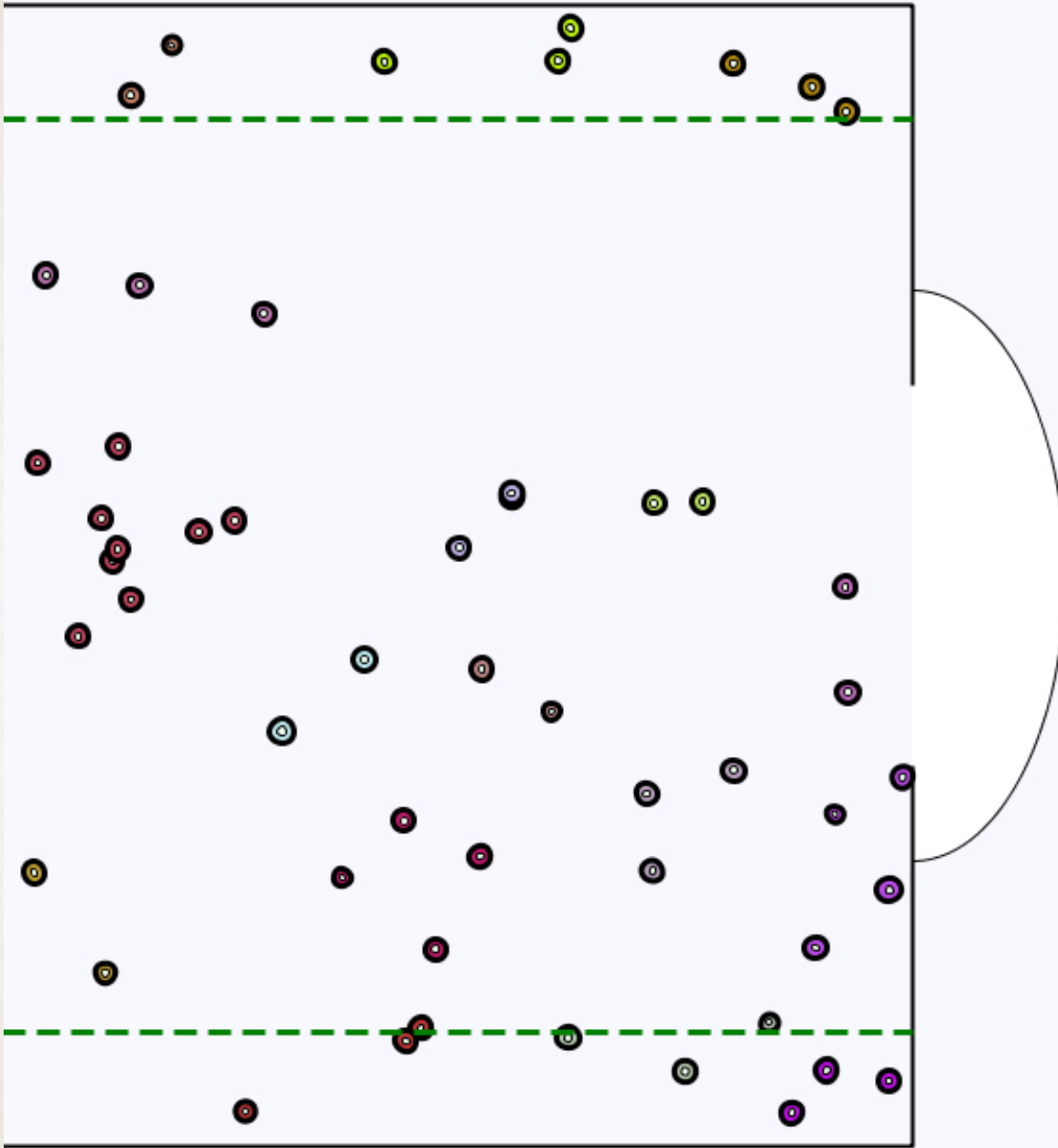
Параметр wallCoef_0 1.2
Параметр wallCoef_1 1.0
Параметр wallCoef_2 0.8
Параметр wallCoef_3 0.7
Параметр varepsilon_0 5.0
Параметр varepsilon_1 10.0
Параметр varepsilon_2 13.0
Параметр zeta 3
Параметр kappa_1 0.5
Параметр kappa_2 2.0
Параметр kappa_3 3.0
Параметр gamma_1 0.5
Параметр gamma_2 0.5
Параметр gamma_3 0.5
Параметр gamma_4 0.5
Параметр gamma_5 0.5
Параметр lambda_vel 0.5
Параметр lambda_max 0.5
Параметр lambda_avg 0.5
Параметр beta_occ_0 0.5
Параметр beta_dir_0 0.3
Параметр beta_dest_0 0.7
Параметр beta_angle_0 0.3
Параметр beta_wall_0 1.0
Параметр beta_vel_0 0.2
Параметр beta_max_0 0.0
Параметр beta_avg_0 0.5
Параметр beta_expl_0 0.0
Параметр beta_occ_1 0.7
Параметр beta_dir_1 0.5
Параметр beta_dest_1 0.7
Параметр beta_angle_1 0.5
Параметр beta_wall_1 1.0
Параметр beta_vel_1 0.0
Параметр beta_max_1 0.6
Параметр beta_avg_1 0.5
Параметр beta_expl_1 0.5
Параметр beta_occ_2 0.8
Параметр beta_dir_2 0.5
Параметр beta_dest_2 0.8
Параметр beta_angle_2 0.6
Параметр beta_wall_2 1.0
Параметр beta_vel_2 0.0
Параметр beta_max_2 0.7
Параметр beta_avg_2 0.6
Параметр beta_expl_2 0.6
Параметр beta_occ_3 0.9
Параметр beta_dir_3 0.1
Параметр beta_dest_3 0.9
Параметр beta_angle_3 0.7
Параметр beta_wall_3 1.0
Параметр beta_vel_3 0.0
Параметр beta_max_3 0.8
Параметр beta_avg_3 0.7
Параметр beta_expl_3 1.0

ФРОНТ ВЫХОДА АГЕНТОВ

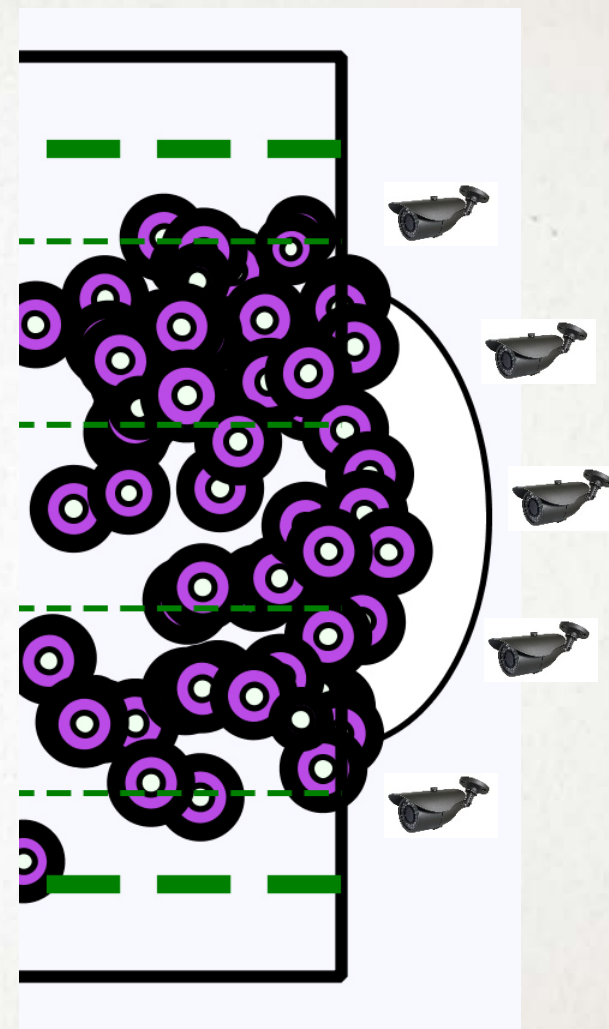
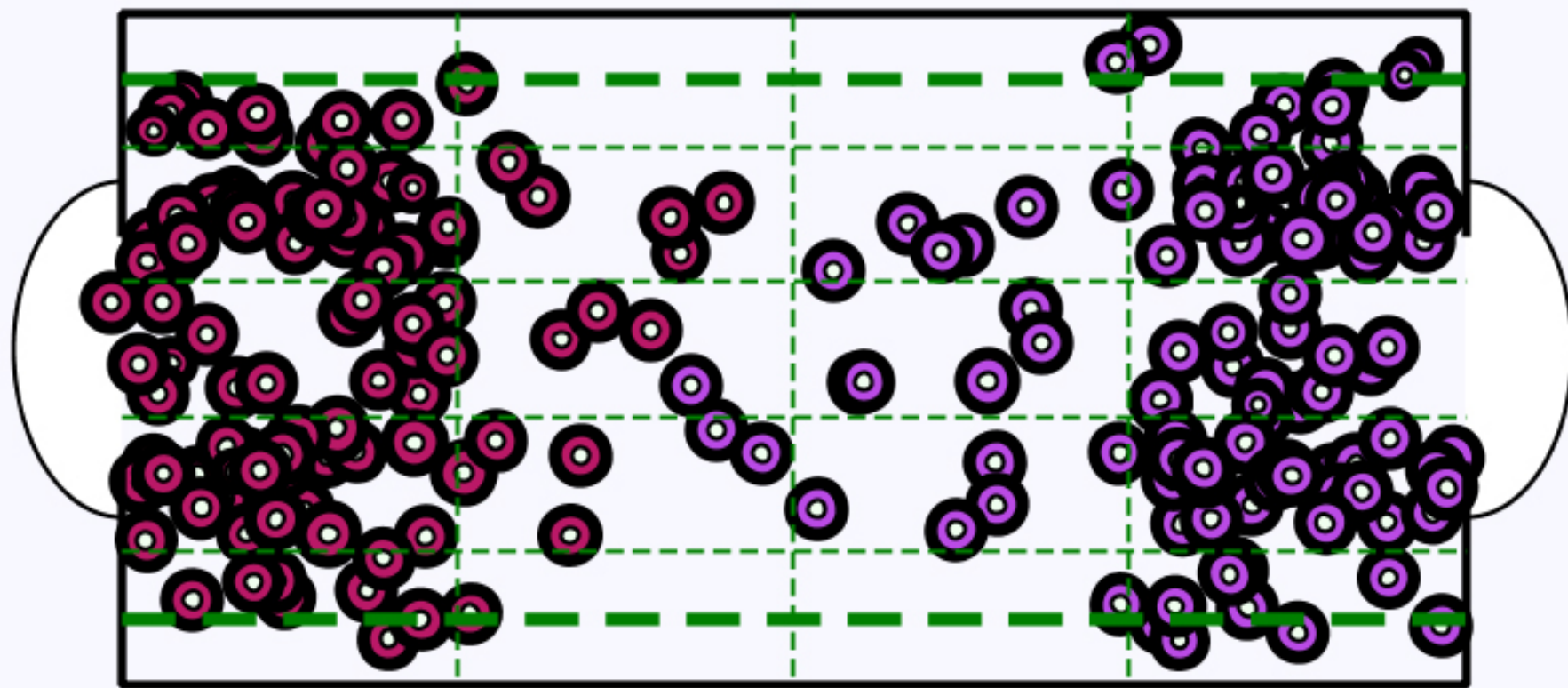
В качестве окончания присутствия агента в модели считается пересечение линии дуги эллипса на выходе – «фронт выхода».

В процессе моделирования рассчитываются следующие функции на фронте выхода:

- Интенсивность по времени.
- Процент вышедших агентов.



ФРОНТ ВЫХОДА (ОБОСНОВАНИЕ)



УРАВНЕНИЕ ФРОНТА ВЫХОДА

Функция $u(x, y)$ – задает усредненную плотность агентов в области вокруг выхода.

Она описывается уравнением Лапласа:

$$\Delta u(x, y) = 0, \quad \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$
$$u|_{\partial\omega} = \varphi, \quad \varphi \in L^1_{2,loc}(\omega)$$

Граничная функция φ – усредненная плотность на границе неограниченной области.

Теорема [3-6]. Пусть $\text{cap}_{\varphi-c}(R^2 \setminus \omega) < \infty$, то есть емкость дополнения области задания функционала конечна для некоторой константы c . Тогда задача имеет решение $u \in L^1_{2,loc}(\omega)$.

НОВИЗНА

1. Разработана имитационная агентная модель поведения толпы, новизной которой является учет как многофакторности системы принятия решений агентами, так и стохастичности ряда процессов, в частности, учет влияния факторов внешней среды (стены, другие агенты, препятствия, взрыв и т.д.) на систему принятия решений агентом, учет радиуса личного пространства агентов и эффекта турбулентности толпы, детальная параметризация начального распределения агентов.
2. Разработан модифицированный алгоритм нечеткой кластеризации, учитывающий факт наличия препятствий на пути следования агента, с учетом текущего направления движения агента, позволяющий существенно улучшить точность идентификации таксонов (кластеров толпы).
3. Впервые получена аналитическая зависимость между параметрами модели и динамикой таксонов (кластеров) при эвакуации.
4. Определена максимальная интенсивность потока при эвакуации на основе решения соответствующей первой краевой задачи на “фронте выхода”.
5. Разработан комплекс программ, отличающийся интеграцией имитационной модели поведения толпы с модифицированным алгоритмом нечеткой кластеризации, модулем кластерного анализа и базой данных системы, а также обеспечивающий возможность дальнейшего развития модели за счет объектно-ориентированного подхода.

ПУБЛИКАЦИИ (ИЗ ПЕРЕЧНЯ ВАК)

1. А. Л. Бекларян, А. С. Акопов. Моделирование поведения толпы на основе интеллектуальной динамики взаимодействующих агентов // Бизнес-информатика. 2015. Т. 31. №1.
2. А. Л. Бекларян. Имитационная модель поведения толпы в среде разработки AnyLogic // Вестник Бурятского государственного университета. 2015. № 9. С. 40-53.
3. А. Л. Бекларян. Фронт выхода в модели поведения толпы при чрезвычайных ситуациях // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2015. Т. 20. № 4. С. 851-856.
4. A. L. Beklaryan. On the Existence of Solutions of the First Boundary Value Problem for Elliptic Equations on Unbounded Domains // Russian Journal of Mathematical Physics. 2012. Vol. 19. No. 4. P. 508-511.
5. A. L. Beklaryan. On the existence of solutions of the first boundary value problem for elliptic equations on unbounded domains // International Journal of Pure and Applied Mathematics. 2013. Vol. 88. No. 4. P. 499-522.
6. А. Л. Бекларян. О существовании решений первой краевой задачи для эллиптических систем высокого порядка в неограниченных областях // Математические заметки. 2014. Т. 96. № 2. С. 310-313.

ВНЕДРЕНИЕ В ООО «ГЕНКЕЙ»



Среди основных направлений деятельности ООО «Генкей» - проектирование, монтаж, шефмонтаж, пуско-наладка спутниковых и наземных систем связи, систем электронной безопасности, охранно-пожарной сигнализации и пожаротушения, а также строительство стрелковых тиров, оснащенных лазерными и видео комплексами.

В рамках сотрудничества с компанией был проведен анализ видеозаписей и датчиков движений на кондитерской фабрике «Красный Октябрь», результатом которого стали статистические данные об интенсивности потока при входе/выходе сотрудников с территории фабрики.

Полученные данные подтвердили модельные расчеты максимальной интенсивности потока на фронте выхода.

БУДУЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Установка разряжающих препятствий на активном пространстве. Оптимизация расположения препятствий.
2. Модель волн сжатия (бегущие волны).
3. Внедрение интеллектуальных агентов-спасателей.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ