

## Выбор эффективных стратегий действий участников процесса госпитализации с использованием нечеткой кооперативной игры и генетического алгоритма

А. В. Смирнов<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, [orcid.org/0000-0001-8364-073X](https://orcid.org/0000-0001-8364-073X)  
Н. Н. Тесля<sup>а</sup>, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, [orcid.org/0000-0003-0619-8620](https://orcid.org/0000-0003-0619-8620),  
[teslya@iias.spb.su](mailto:teslya@iias.spb.su)

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, 14-я линия В. О., 39, Санкт-Петербург, 199178, РФ

**Введение:** использование методов линейного программирования при принятии решений о госпитализации в условиях сложной эпидемиологической ситуации является затруднительным из-за необходимости учитывать большое количество параметров и ограничений участников при постановке и решении задачи. **Цель:** разработать подход к выбору эффективных стратегий действий участников процесса госпитализации с учетом социально ориентированных факторов, основанный на теории кооперативных игр, решение которых осуществляется с помощью генетического алгоритма. **Результаты:** разработана стоимостная функция оценки эффективности процесса госпитализации на основе выбранных стратегий с учетом социально ориентированных факторов. Построен генетический алгоритм, в котором в качестве функции приспособленности популяции используется предложенная функция оценки эффективности, а хромосомы особей определяются множеством выбранных стратегий участников процесса госпитализации. Подход был апробирован на данных о госпитализациях больных с подозрением на COVID-19, предоставленных несколькими станциями скорой медицинской помощи Санкт-Петербурга. Показано превосходство предложенного подхода над разработанным ранее с точки зрения скорости решения кооперативной игры при сохранении качества полученного решения. **Практическая значимость:** программное обеспечение на основе предложенного подхода может быть интегрировано в автоматизированное рабочее место «Диспетчер станции скорой помощи» для поддержки принятия решений в процессе госпитализации в условиях сложной эпидемиологической обстановки.

**Ключевые слова** – генетический алгоритм, стратегия, выбор стратегии, госпитализация, функция приспособленности.

**Для цитирования:** Смирнов А. В., Тесля Н. Н. Выбор эффективных стратегий действий участников процесса госпитализации с использованием нечеткой кооперативной игры и генетического алгоритма. *Информационно-управляющие системы*, 2022, № 2, с. 42–52. doi:10.31799/1684-8853-2022-2-42-52

**For citation:** Smirnov A. V., Teslya N. N. Selecting effective action strategies for the participants in a hospitalization process with the use of a fuzzy cooperative game and a genetic algorithm. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2022, no. 2, pp. 42–52 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2022-2-42-52

### Введение

В решении вызовов, поставленных пандемией COVID-19, значимая роль отводилась системам на основе методов искусственного интеллекта [1]. Помимо разработки вакцин и создания прогностических моделей распространения заболевания, часто применялись методы управления кризисными ситуациями для задач госпитализации, распределения ресурсов и планирования работы систем здравоохранения. К преимуществам использования методов управления кризисными ситуациями на основе искусственного интеллекта можно отнести оперативность, возможность учета большего количества факторов, чем доступно человеку, объективность. Однако есть и ряд недостатков, связанных с ограниченностью типов ситуаций, в которых может применяться интеллектуальное управление, излишней объективностью, что в условиях тяжелой эпидемиологической ситуации может приносить дополнительный вред пациентам.

В исследованиях, проводимых в контексте пандемии COVID-19, отмечается, что негативное влияние на людей вызывается недостаточностью информации о текущей ситуации, а также фиксируется кумулятивный характер стрессового воздействия [2]. Неблагоприятными факторами для всех участников процесса принятия решений являются тревожность, страх заражения, вынужденная изоляция от членов семьи [3], нарастание тревожности и депрессивных состояний [4], что во многом обусловлено распространением угрожающей, эмоциональной информации о невидимой угрозе. Это приводит к постоянному обращению людей к источникам подобной информации, вызывает сомнения в том, что в данных условиях можно рассчитывать на полноценное и качественное медицинское обслуживание. Отсутствие средств защиты, проблемы с адекватным лечением, а также чисто человеческие факторы: переутомление, напряжение, тревога и профессиональное выгорание медицинского

персонала [4–6] — вызывают негативные эмоциональные состояния.

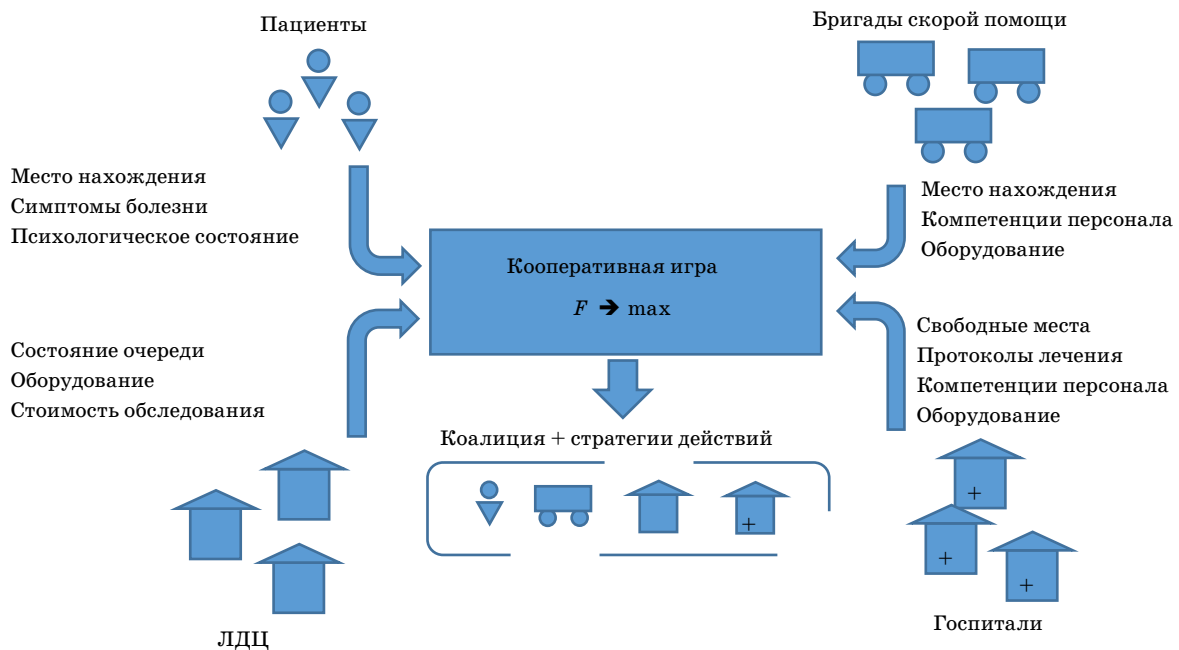
В работе предлагается учесть влияние психологических факторов на принятие решения о госпитализации путем формализации задачи принятия решений о госпитализации с использованием нечетких кооперативных игр. Учет психологических факторов осуществляется как формализацией динамики состояния пациентов и персонала скорой помощи, так и формированием пула стратегий, которыми может руководствоваться каждый из типов участников (пациенты, кареты скорой медицинской помощи, госпитали, лабораторно-диагностические центры) при принятии решения о госпитализации. Решением задачи является набор составов коалиций в зависимости от стратегий их действий.

С учетом того, что полученная формализация задачи является NP-полной (поскольку необходимо проверить все комбинации участников со всеми возможными стратегиями), решение кооперативной игры путем полного перебора при большом количестве участников в реальных условиях не представляется возможным. Для удовлетворения требованиям оперативности в настоящей работе предлагается эвристический метод решения, основанный на использовании генетического алгоритма (ГА), что допустимо в данном виде задач, поскольку в них отсутствует требование поиска глобального максимума, — достаточно, чтобы решение было квазиоптимальным в локальной области решений.

### Постановка задачи и существующие методы решения

Процесс госпитализации включает несколько этапов, на каждом из которых требуется принять решение, оказывающее влияние на действия на следующих этапах. Этапы включают направление бригады скорой помощи к пациенту, осмотр пациента и принятие решения о необходимости дополнительного обследования, выбор места дополнительного обследования и выбор места госпитализации. Главными активными участниками процесса являются пациент, карета скорой помощи, госпиталь, лабораторно-диагностический центр ЛДЦ (рис. 1). Диспетчер станции скорой помощи определяется как независимое лицо, принимающее решение на основе требований участников процесса и текущего состояния системы, состоящей из всех четырех участников.

Рассматриваемая в статье задача направлена на поддержку диспетчера при принятии им решений на каждом из этапов. Предлагается рассматривать систему «пациент — бригада скорой помощи — госпиталь — ЛДЦ» в виде кооперативной игры с ненулевой суммой, где все участники руководствуются общим интересом и должны взаимодействовать между собой для снижения риска ухудшения состояния пациента. Оценка затрат коалиции сводится к оценке суммарных затрат каждого участника, рассчитанных с учетом социальной ориентированно-



■ **Рис. 1.** Схема формирования коалиции с использованием кооперативной игры  
 ■ **Fig. 1.** Scheme of forming a coalition using a cooperative game

сти принимаемых решений при осуществлении выбранных стратегий [7]. В состав коалиции может входить только по одному участнику каждого типа, при этом участники всех типов, кроме пациентов, могут входить в состав нескольких коалиций с дополнительными ограничениями, например с учетом доступного временного окна и пространственного распределения участников.

Решение похожих задач в существующих исследованиях опирается на использование двух групп методов: теории кооперативных игр и генетических алгоритмов. Обе группы методов преследуют цель поиска оптимального состава коалиции с учетом ограничений, являющихся частью постановки задачи.

#### 1. Использование кооперативных игр для решения задачи оптимизации.

Использование нечеткой логики и кооперативных игр для описания взаимодействия участников коалиции — относительно новый подход, который показал свою эффективность в задачах конфигурации цепочки поставок [8] и формирования коалиции роботов [9]. Математический аппарат нечеткой логики и кооперативных игр может быть использован также для оценки эффективности госпиталей [10] по большому количеству параметров, в том числе по количеству и качеству персонала (врачей, медсестер, вспомогательного персонала), количеству коек, количеству операций, затратам на лечение и обслуживание.

#### 2. Формирование групп с использованием ГА.

Формирование групп участников на основе оценки эффективности их взаимодействия при решении сложной задачи является актуальным вопросом для многих проблемных областей. Применение эволюционных алгоритмов для их решения видится многими исследователями как один из перспективных вариантов. В частности, разработаны подходы на основе эволюционных алгоритмов решения задачи формирования групп учащихся для обеспечения большего разнообразия студенческих профилей в группе [11]; выбора поставщиков продукции в виде задачи назначения на основе стоимости [12–15]; формирования группы на основе географической удаленности с максимальной упаковкой при минимальном заданном расстоянии между членами группы [16]; формирования коалиции в мультиагентной системе [17]. В последнем случае в зависимости от специфики задачи распределение членов коалиции и задачи может быть следующим: одна задача — одна коалиция, много задач — одна коалиция, много задач — много коалиций. В любом из случаев для формирования состава коалиций и распределения задач разработаны подходы, использующие ГА [18–20].

### Использование нечеткой кооперативной игры при госпитализации

В этом разделе рассматривается формализация задачи в терминах кооперативной игры для формирования коалиции с выбором эффективной стратегии действий при госпитализации в условиях пандемии. Формализация основана на ранней работе [21] и расширена случаем наличия более двух стратегий у одного из участников. Для описания игры формируется набор параметров, которые становятся исходными данными для вычисления значений характеристической функции коалиции. Решение кооперативной игры будет содержать коалиции участников игры, обеспечивающие минимальные затраты с точки зрения времени и стоимости госпитализации, а также стратегии действий участников коалиции. Также будет определен госпиталь, в который необходимо доставить пациента, и ЛДЦ, где при необходимости можно будет пройти дополнительное обследование.

Кооперативная игра представляется в виде множества  $(N, v)$ , где  $N$  — множество игроков,  $v$  — характеристическая функция игры. В рассматриваемой задаче значение характеристической функции конкретной коалиции соответствует суммарным затратам входящих в нее игроков.

Множество  $N$  всех игроков кооперативной игры разделим на четыре подмножества: пациенты, нуждающиеся в госпитализации  $N^P$ ; персонал машин скорой помощи  $N^A$ ; госпитали  $N^H$ ; ЛДЦ  $N^{CT}$  —  $N = N^P \cup N^A \cup N^H \cup N^{CT}$ . Для упрощения рассмотрим ситуацию принятия, когда бригада скорой помощи уже прибыла к пациенту, и необходимо принять решение о целесообразности компьютерной томографии и выбрать наиболее подходящие ЛДЦ и госпиталь. Для каждого игрока в каждой из групп задан набор стратегий, которые он может выбрать в зависимости от текущей ситуации и собственных поведенческих паттернов, что может рассматриваться как нечеткая функция принадлежности коалиции. Выбор каждой из стратегий может как увеличивать, так и уменьшать затраты коалиции в зависимости от контекста текущей ситуации.

Пациенту соответствуют стратегии  $\eta^P$ , определяющие согласие или отказ в госпитализации. Значение затрат игрока-пациента при выборе стратегии зависит от комбинации физического и психологического состояния пациента. Для госпиталя заданы стратегии  $\eta^H$ , определяющие согласие или отказ в приеме пациента. Для бригады скорой помощи заданы три стратегии  $\eta^A$ : оставить пациента дома, транспортировать в ЛДЦ и транспортировать в госпиталь. ЛДЦ имеет две стратегии  $\eta^{CT}$ : принять или отказать в приеме па-

циента. Перечисленные стратегии игроков  $i \in P$ ,  $j \in H$ ,  $k \in A$ ,  $l \in CT$ , входящих в коалицию, формируют вектор стратегий коалиции  $\eta_{i,j,k,l} = \{\eta_i, \eta_j, \eta_k, \eta_l\}$ .

Функция принадлежности игрока к коалиции для варианта, в котором у игрока имеется две стратегии, определяет вероятность того, будет ли входить участник в состав коалиции в зависимости от вероятности  $x$  выбора стратегии:

$$\eta(x) = \begin{cases} 0, & x < 0,5 \\ 1, & x > 0,5 \end{cases} \quad (1)$$

В случае, когда участник принадлежит типу «бригада скорой помощи», у него имеется три стратегии действий, а значения в формуле (1) будут выражаться через зависимость от стратегий других участников следующим образом:

$$\eta^A = \begin{cases} 0, & (\eta^H + \eta^{CT} + \eta^P) / 3 < 2 / 3 \\ 1, & (\eta^H + \eta^{CT} + \eta^P) / 3 > 2 / 3 \end{cases} \quad (2)$$

Далее определим составляющие, необходимые для вычисления суммарных затрат коалиции и расчета значения характеристической функции.

Для расчета общих затрат коалиции необходимо первым делом определить затраты каждого отдельного участника. Чтобы учесть динамику развития ситуации, введем время обработки пациента  $t_{i,j,k,l} = f(C^P, C^H, C^A, C^{CT})$ , учитывающее выбранную стратегию  $\eta_{i,j,k,l}$ . Данная функция включает контексты всех типов участников кооперативной игры, относительно которых рассматриваются возможные стратегии действий для каждого участника.

$f^P(C^P, t_{i,j,k,l}, C^P)$  — это функция затрат пациента  $i$ , значение которой рассчитывается на основе его текущего состояния  $C^P$  (физиологического и психологического) и прогнозируемого финального состояния  $C^P$  по истечении времени  $t_{i,j,k,l}$ :

$$f^P(C^P, t_{i,j,k,l}, C^P) = \alpha_1 t + \alpha_2 PHI' + \alpha_3 PSY', \quad (3)$$

где  $t$  — прогнозируемое время транспортировки пациента до госпиталя, которое вычисляется как сумма нескольких составляющих:

$$t = t_{trans\ pCT} + t_{wCT} + t_{procCT} + t_{trans\ pH} + t_{wH} + t_{procH},$$

где  $t_{trans\ pCT}$  — время транспортировки в ЛДЦ;  $t_{wCT}$  — время ожидания в очереди ЛДЦ;  $t_{procCT}$  — время обслуживания одного пациента специалистом ЛДЦ, включая время обследования, расшифровки диагноза и подготовки к следующему пациенту;  $t_{trans\ pH}$  — время транспортировки в госпиталь;  $t_{wH}$  — время ожидания в очереди госпиталя;  $t_{procH}$  — вре-

мя, затраченное на прием пациента в госпитале;  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  — весовые коэффициенты.  $PHI' = f_{PHI}(f_{PHI}^{-1}(PHI) - t)$  — прогнозируемое физиологическое состояние. Предлагаемая эвристика оценивает физиологическое состояние пациента  $PHI'$ , где  $PHI$  — начальное физиологическое состояние;  $f(PHI)$  — функция, определяющая физиологическое состояние пациента через время  $t$  на основе параметров здоровья, характеризующих течение заболевания (частоты сердечных сокращений, частоты дыхания, сатурации крови кислородом, давления, температуры тела, возраста), объединяя их в интегральный показатель  $PHI$ , определяемый в диапазоне  $[0, 1]$ .  $PSY' = f_{PSY}(f_{PSY}^{-1}(PSY, PHI) - t, PHI)$  описывает прогнозируемое психологическое состояние, где  $PSY$  обозначает психологическое состояние;  $f(PSY)$  — эвристическая функция, определяющая психологическое состояние пациента по прошествии времени  $t$ . Предлагаемая эвристика оценивает психологическое состояние в диапазоне  $[0, 1]$ .

Использование эвристик в расчете функции затрат пациента обеспечивает учет социоориентированных факторов, влияющих на выбор стратегии действия пациентом при принятии решения о госпитализации. Это обусловлено тем, что итоговая стоимость следования выбранной стратегии для пациента всегда обеспечивается не только его прямыми затратами, но и потенциальным риском, связанным с его физическим и психологическим состоянием, вызванным дополнительным стрессом при выборе нежелательной стратегии.

Функция  $f^H(C^H, t_{i,j,k,l}, C^H)$  затрат для госпиталя  $j$  учитывает затраты на лечение пациента. Значение функции вычисляется на основе текущего состояния  $C^H$  (физиологической и психологической усталости персонала, запаса расходных средств и медикаментов), свободного коечного фонда  $B^H$ , стоимости содержания и лечения одного пациента  $cost^H$  (в среднем по России за 2020 г. 115 566 руб.) [22], среднего времени ожидания в очереди на прием  $t_{wH}$  и прогнозируемого конечного состояния  $C^H$ :

$$f^H(C^H, t_{i,j,k,l}, C^H) = cost^H / B^H (1 + t_{wH}). \quad (4)$$

Также в функции (4) может быть использован тип госпиталя, в зависимости от которого принимается решение о госпитализации или необходимости дополнительного осмотра. Специализированный госпиталь может дообследовать пациента в собственном ЛДЦ. В неспециализированный стационар можно принять пациента только при наличии результата компьютерной томографии, сделанной в ЛДЦ.

Для определения значения функции затрат бригады  $k$  скорой помощи  $f^A(C^A, t_{i,j,k,l}, C^A)$  ис-

пользуется текущее состояние  $C^A$  бригады (психологическая усталость персонала, стоимость часа работы с учетом времени доставки пациента в ЛДЦ и в госпиталь  $t_{i,j,k,l}$ ), а также прогнозируемое состояние  $C^A$ :

$$f^A(C^A, t_{i,j,k,l}, C^A) = \alpha_1 t_{i,j,k,l} + \alpha_2 t_{i,j,k,l} \cdot \text{cost}^A + \alpha_3 \text{PSY}', \quad (5)$$

где  $\text{cost}^A$  — стоимость часа работы бригады скорой помощи; время работы с пациентом  $t_{i,j,k,l} = t_{\text{trans } p_{CT}} + t_{w_{CT}} + t_{\text{proc}_{CT}} + t_{\text{trans } p_H} + t_{w_H}$ ; прогнозируемое психологическое состояние бригады скорой помощи  $\text{PSY}' = f^{-1}(f(\text{PSY}), t_{i,j,k,l})$ .

Функция  $f^{CT}(C^{CT}, t_{i,j,k,l}, C^{CT})$  затрат для ЛДЦ  $l$  вычисляется через его текущее состояние  $C^{CT}$ , затраты с учетом времени ожидания и времени обследования пациента  $t_{i,j,k,l} = t_{w_{CT}} + t_{\text{proc}_{CT}}$  и прогнозируемое состояние:

$$f^{CT}(C^{CT}, t_{i,j,k,l}, C^{CT}) = \alpha_1 (t_{w_{CT}} + t_{\text{proc}_{CT}}) + \alpha_2 (\text{cost}^{CT})^{-1}, \quad (6)$$

где  $\text{cost}^{CT}$  — стоимость часа работы ЛДЦ.

Общие затраты коалиции вычисляются как сумма произведений нормализованных затрат отдельных участников и их стратегий:

$$\omega_{i,j,k,l} = \eta_i f^P(C^P, t_{i,j,k,l}, C^P) + \eta_j f^H(C^H, t_{i,j,k,l}, C^H) + \eta_k f^A(C^A, t_{i,j,k,l}, C^A) + \eta_l f^{CT}(C^{CT}, t_{i,j,k,l}, C^{CT}). \quad (7)$$

В целом для кооперативной игры в форме затрат характеристическая функция  $v$  для коалиции  $\{i, j, k, l\}$  может быть определена следующим образом:

$$v = \min_{i,j,k,l} \omega_{i,j,k,l} \eta_{i,j,k,l}. \quad (8)$$

### Использование ГА для решения кооперативной игры

Использование ГА предполагает определение следующих главных параметров: хромосомы и функции приспособленности.

Для представленной выше формализации задачи в качестве функции приспособленности может быть использована функция затрат коалиции (7). Однако, поскольку в ГА основным критерием отбора особей является их наилучшая приспособленность, т. е. максимизация функции приспособленности, а решаемая задача сформулирована в терминах минимизации затрат, в качестве функции приспособленности следует рас-

сматривать функцию, обратную функции затрат коалиции:

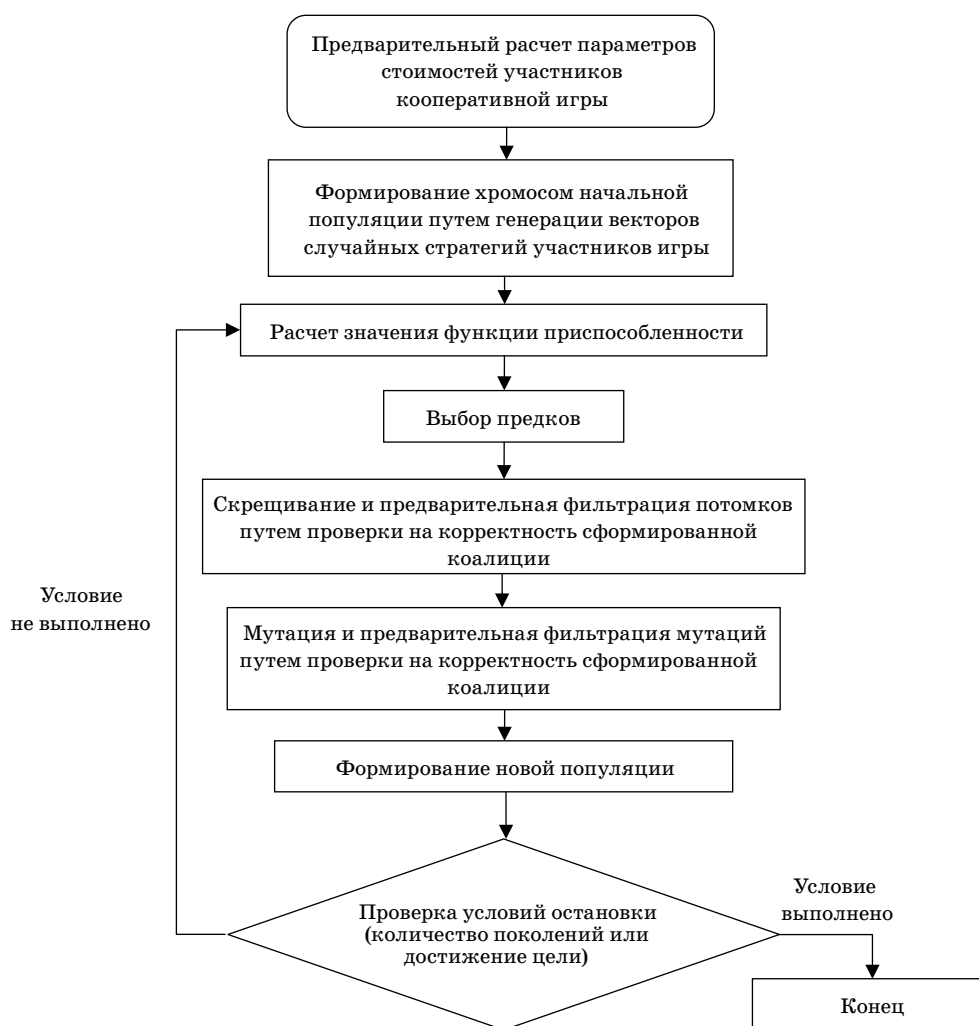
$$F = \omega_{i,j,k,l}^{-1}. \quad (9)$$

Условием останова ГА в данном случае будет являться достижение в нескольких поколениях порога отклонения значения затрат коалиции от минимального за все время выполнения алгоритма (рис. 2).

Для описания состава и стратегий коалиции используется хромосома, определяющаяся вектором, в котором каждый элемент (ген хромосомы) соответствует стратегии участников. Хромосома разделяется на четыре участка, размеры которых определяются количеством участников каждого типа. Для формирования хромосомы определено также дополнительное условие, ограничивающее единицей количество активированных генов на каждом участке. Смысл этого ограничения заключается в том, что из каждого множества участников в одну коалицию может входить только один из участников каждого типа. В данном случае необходимо осуществлять несколько запусков процедуры поиска решения, последовательно исключая пациентов, для которых была сформирована коалиция. В такой постановке проще учитывать временные ограничения, возникающие при формировании коалиции, но усложняется формирование новых особей, в ходе которого необходимо проверять условие формирования хромосомы, из-за чего большое количество особей будет отсеиваться как не подходящие под условие. Значительный отсев особей также замедляет эволюцию при использовании алгоритмов случайного формирования потомков и случайных мутациях, что приводит к увеличению длительности поиска решения.

Первый набор особей формируется случайным образом по количеству пациентов. После расчета значений функции приспособленности проводят отбор особей по максимальному значению функции приспособленности. Применительно к описываемой задаче предлагается использовать метод steady-state selection [23], в котором осуществляется выбор особей с наибольшими значениями функции приспособленности и замещение их потомками особей с наименьшими значениями функции приспособленности.

Затем выполняется процедура скрещивания, в ходе которой из оставшихся особей путем случайного выбора определяется точка, в которой будет разорвана хромосома и путем перемешивания образованы новые особи. Каждая новая особь проверяется на условие, согласно которому в коалицию должен входить только один участник каждого типа. Все особи, не соответствующие



■ *Рис. 2.* Принцип работы ГА

■ *Fig. 2.* Genetic algorithm work principle

данному условию, отсеиваются как неподходящие.

Дополнительно к скрещиванию может применяться метод мутации для вывода решения из локального минимума. Применение данного метода происходит в ситуации, когда на протяжении двух итераций состав потомков не изменяется. Мутация проводится адаптивным методом, в ходе которого популяция разделяется на два подмножества по среднему значению функции приспособленности. В подмножестве, имеющем значения функции меньше медианного, проводится большее количество мутаций, а в подмножестве, имеющем значение функции больше медианного, — меньшее количество [24]. Если после мутации ситуация не изменилась, то считается, что решение найдено, и особь из последней популяции, имеющая самое низкое значение затрат, возвращается в качестве итогового решения.

### Реализация ГА для поиска решения кооперативной игры и результаты моделирования

Для реализации ГА был выбран язык программирования Python и библиотека PyGAD [25], включающая большое количество функций, реализующих существующие методы выбора предков, выполнения скрещивания, мутации, формирования новой популяции.

В качестве тестового стенда использовался персональный компьютер со следующими параметрами: центральный процессор Intel Core i9 10900X 3,7 ГГц, 64Gb DDR4 RAM, интерпретатор запускался в виртуальной среде Docker, взаимодействие с которой осуществлялось посредством программного пакета Jupyter.

Реализация алгоритма включает в себя программное описание классов, соответствующих описанию каждого из типов участников коопера-

тивной игры. Программные классы содержат основные параметры участника, дополнительные функции обработки параметров и функции вычисления стоимости кооперативной игры.

Для поиска решения кооперативной игры было проведено два эксперимента в целях оценки скорости работы ГА и сравнения его с полным перебором в задаче выбора стратегии. Реализация полного перебора описана в статье [21]. Для каждого типа участников было сгенерировано 10 объектов в первом эксперименте и 100 во втором. По количеству участников в экспериментах была сформирована начальная популяция для поиска решения кооперативной игры. Функция приспособленности игры в обоих случаях определялась отдельно как скалярное произведение вектора стратегий и вектора затрат участников коалиций. Дополнительно в функции приспособленности реализована проверка корректности состава коалиции. Корректность проверяется на вхождение только одного участника каждого типа в коалицию. Особым популяции, не удовлетворяющим условию корректности, присваивается значение функции приспособленности, равное нулю, что исключает их из рассмотрения в качестве возможных родителей на этапе скрещивания и затем исключает из состава популяции на этапе отбора.

Для запуска ГА были также определены базовые параметры (таблица), выбор значений которых обусловлен достижением сходимости функции приспособленности ГА менее чем за 3000 поколений как в первом эксперименте (рис. 3, а), так и во втором (рис. 3, б).

Следует отметить различную скорость сходимости в зависимости от начальных условий и начальной популяции (см. рис. 3, а). На рисунке слева заметна высокая скорость изменений и достижение локального минимума функции

приспособленности (по оси ординат) за 1500 поколений (по оси абсцисс), что можно интерпретировать как старт близко к максимуму, который при этом ярко выражен. На правом же рисунке отмечается минимум изменений (порядок изменений  $10^{-5}$ ), что означает попадание в локальный максимум первоначальной популяцией и малую корректировку значения функции приспособленности между поколениями.

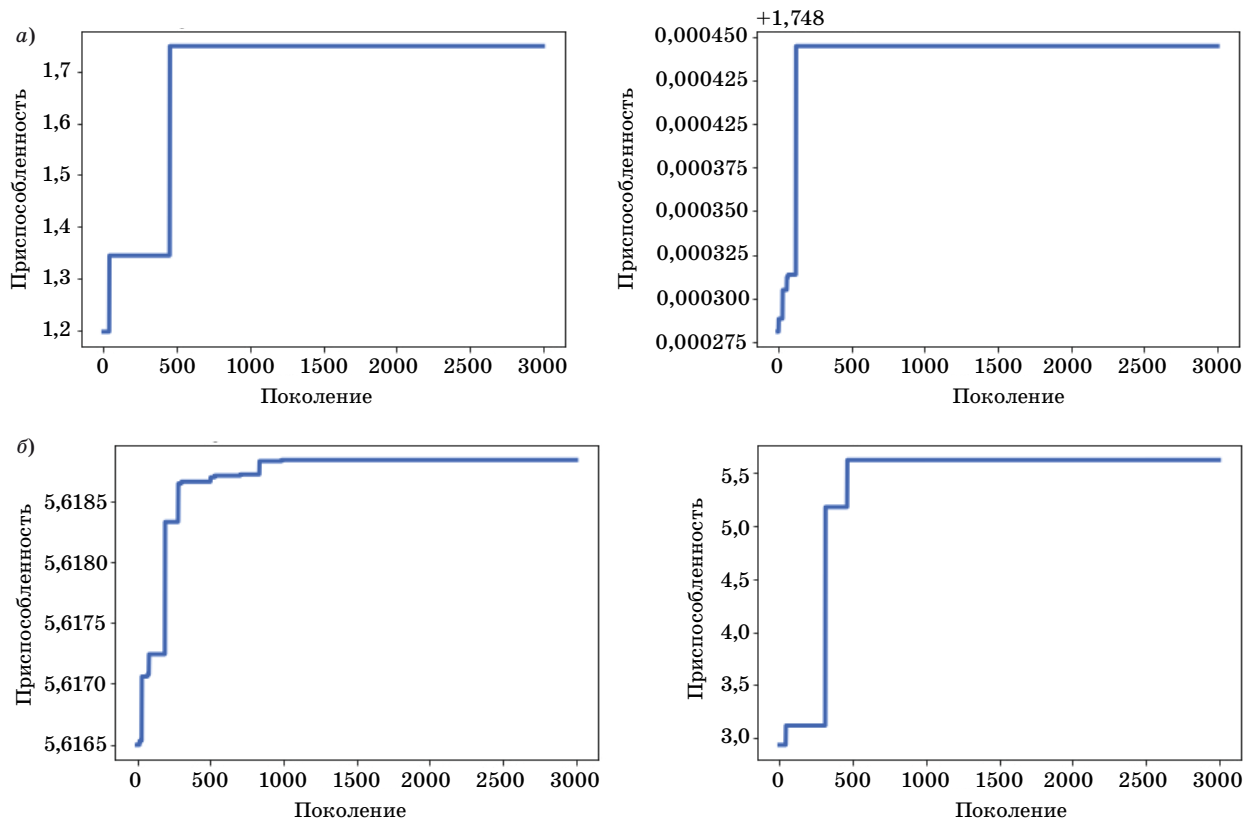
Для второго эксперимента, когда число участников значительно больше (400 участников и  $10^8$  возможных составов коалиций), наблюдается меньшая скорость сходимости функции приспособленности и большее количество изменений (см. рис. 3, б), однако параметры, определенные в таблице, также обеспечивают сходимость менее чем за 3000 поколений.

Полученное лучшее решение представляет собой вектор стратегий, которые должны быть применены выбранными участниками коалиции в кооперативной игре. При следовании выбранным стратегиям значение затрат коалиции будет минимальным. Поиск решения для первого случая при выбранных параметрах занял 22 с, что медленнее, чем в случае полного перебора, а для второго случая — 2328 с, что значительно быстрее полного перебора. Сравнение скорости работы с вариантом полного перебора из работы [21] представлено на рис. 4.

При этом значение затрат, к которому стремится функция приспособленности, отличается от значения, полученного в работе [21], полным перебором, поскольку постановка задачи отличается (0,57 для 40 участников и 0,114 для 100 участников в среднем при работе ГА и 2,86 при полном переборе). При переводе значения функции приспособленности в денежный эквивалент необходимо посчитать обратное значение от функции приспособленности и использовать

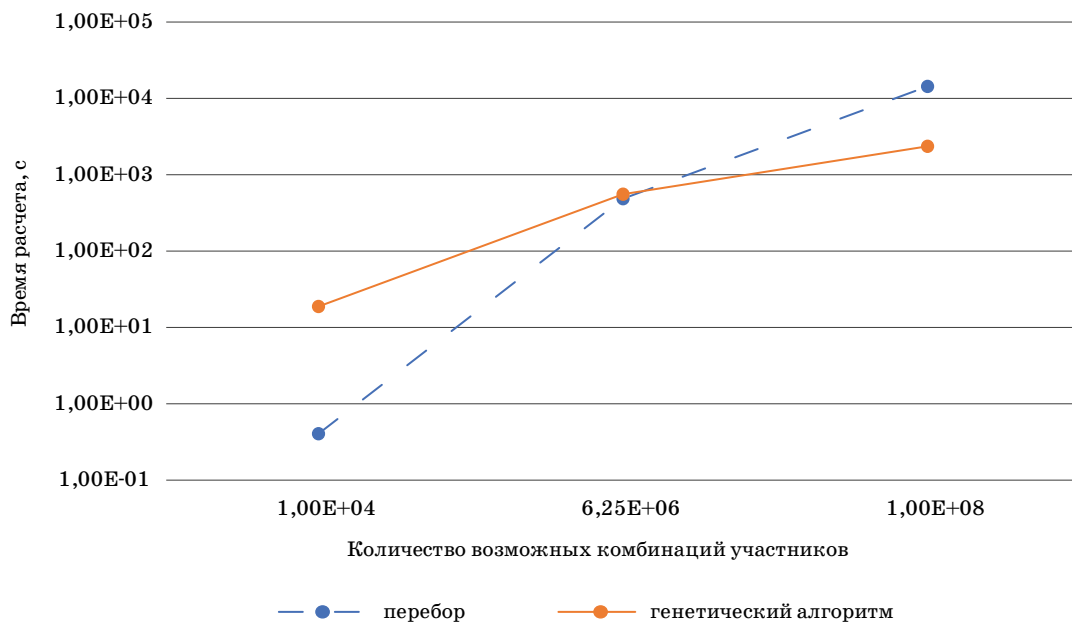
- Параметры запуска генетического алгоритма
- Launch parameters of the genetic algorithm

| Параметр  | Значение                    |
|---|-----------------------------|
| Верхняя планка количества поколений   | 3000                        |
| Количество родителей для скрещивания  | 10                          |
| Количество потомков в популяции   | 100                         |
| Метод выбора родителей  | Steady-state selection [23] |
| Количество сохраняемых родителей  | 3                           |
| Метод скрещивания   | Одна точка                  |
| Метод мутации   | Адаптивный                  |
| Количество генов мутации для значений функции приспособленности ниже медианного | 20                          |
| Количество генов мутации для значений функции приспособленности выше медианного | 2                           |



■ **Рис. 3.** Примеры изменения значения функции приспособленности: *a* — для 40 участников ( $10^4$  возможных составов коалиций); *б* — для 400 участников ( $10^8$  возможных составов коалиций)

■ **Fig. 3.** Examples of changing the value of the fitness function: *a* — for 40 participants ( $10^4$  possible compositions of coalitions); *б* — for 400 participants ( $10^8$  possible compositions of coalitions)



■ **Рис. 4.** Сравнение длительности работы алгоритма полного перебора и ГА в задаче выбора эффективной стратегии действий при госпитализации

■ **Fig. 4.** Comparison of the duration of the exhaustive search algorithm and the genetic algorithm in the problem of choosing an effective strategy of actions during hospitalization



коэффициент нормирования, рассчитанный от стоимости лечения в госпитале (4), как имеющий основной вклад в функцию затрат. В среднем в зависимости от выбранной стратегии и времени лечения он составляет 90 000 руб. Таким образом, средние «затраты» коалиции при выбранных стратегиях с использованием ГА можно оценить в 51 300 руб. Эти затраты включают в себя как прямые затраты на стоимость лечения в госпитале, затраты на госпитализацию бригадой скорой помощи и затраты на дополнительные исследования в ЛДЦ, которые будут им возмещены, так и оценку средств, которые «потратит» пациент, следуя предложенной стратегии.

### Заключение

В работе проведена формализация выбора эффективной стратегии действий участников процесса госпитализации на основе нечетких кооперативных игр.

Поскольку выбор стратегии для всех комбинаций участников является NP-полной задачей, предложено решение с использованием ГА. Для этого сформированы дополнительные правила фильтрации потомков после этапов скрещивания и мутации в целях проверки их на соответствие базовым правилам формирования коалиции.

Предложенное решение опробовано на данных, полученных в ходе анализа процесса госпитализации и модели кооперативной игры, представленной в работе [21]: сходимость решения достигается в среднем за 3000 поколений, среднее время на поиск стратегий для игры из 40 участни-

ков составляет около 22 с, для 400 участников — 2328 с. Результат, полученный с помощью ГА, близок к решению, полученному полным перебором, что позволяет использовать предложенный метод для решения задачи выбора эффективной стратегии действий участников процесса госпитализации. При этом длительность поиска всех возможных составов коалиции с использованием ГА растет практически линейно, в то время как длительность поиска с использованием полного перебора растет полиномиально ( $O(n^k)$ , где  $k = 4$ ).

В качестве направления дальнейших исследований определена оптимизация функций мутации и скрещивания для большего соответствия поставленной задаче. В реализации, приведенной в статье, использовались стандартные функции библиотеки PyGAD, которые, несмотря на дополнительную фильтрацию особей по критерию корректности, не полностью соответствуют требованиям поставленной задачи, что существенно замедляет процесс эволюции, поскольку необходимо производить большее количество потомков и их фильтрацию. Адаптация данных функций под задачу может существенно повысить скорость достижения максимума функции приспособленности за счет генерации особей сразу с корректными параметрами.

### Финансовая поддержка

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-04-60054, а также в рамках бюджетной темы № FFZF-2022-0005.

### Литература

- Onder M., Uzun M. M. Roles of Artificial Intelligence (AI) on COVID-19 pandemic crisis management policies. *International Journal of Public Administration in the Digital Age*, 2022, vol. 8, no. 2, pp. 1–13. doi:10.4018/ijpada.294122
- Xiong J., Lipsitz O., Nasri F., Lui L. M. W., Gill H., Phan L., Chen-Li D., Iacobucci M., Ho R., Majeed A., McIntyre R. S. Impact of COVID-19 pandemic on mental health in the general population: A systematic review. *Journal of Affective Disorders*, 2020, vol. 277, pp. 55–64. doi:10.1016/j.jad.2020.08.001
- Shah K., Kamrai D., Mekala H., Mann B., Desai K., Patel R. S. Focus on mental health during the coronavirus (COVID-19) pandemic: Applying learnings from the past outbreaks. *Cureus*, 2020, vol. 12, iss. 3. doi:10.7759/cureus.7405
- Montemurro N. The emotional impact of COVID-19: From medical staff to common people. *Brain, Behavior, and Immunity*, 2020, vol. 87, pp. 23–24. doi:10.1016/j.bbi.2020.03.032
- Li W., Yang Y., Liu Z.-H., Zhao Y.-J., Zhang Q., Zhang L., Cheung T., Xiang Y.-T. Progression of mental health services during the COVID-19 outbreak in China. *International Journal of Biological Sciences*, 2020, vol. 16, pp. 1732–1738. doi:10.7150/ijbs.45120
- Mo Y., Deng L., Zhang L., Lang Q., Liao C., Wang N., Qin M., Huang H. Work stress among Chinese nurses to support Wuhan in fighting against COVID-19 epidemic. *Journal of Nursing Management*, 2020, vol. 28, pp. 1002–1009. doi:10.1111/jonm.13014
- Красников К. Е. Математическое моделирование некоторых социальных процессов с помощью теоретико-игровых подходов и принятие на их основе управленческих решений. *Russian Technological Journal*, 2021, т. 9, № 5, с. 67–83. doi:10.32362/2500-316X-2021-9-5-67-83
- Sheremetov L. B., Smirnov A. V. *Supply Chain Configuration as a Cooperative Game with Fuzzy Coalitions*

- tions. Supply Chain Management Under Fuzziness. Springer, 2014. Pp. 293–314. doi:10.1007/978-3-642-53939-8\_13
9. Mohebbi S., Li X. Coalitional game theory approach to modeling suppliers' collaboration in supply networks. *International Journal of Production Economics*, 2015, vol. 169, pp. 333–342. doi:10.1016/j.ijpe.2015.08.022
  10. Omrani H., Shafaat K., Emrouznejad A. An integrated fuzzy clustering cooperative game data envelopment analysis model with application in hospital efficiency. *Expert Systems with Applications*, 2018, vol. 114, pp. 615–628. doi:10.1016/j.eswa.2018.07.074
  11. Miranda P. B. C., Mello R. F., Nascimento A. C. A. A multi-objective optimization approach for the group formation problem. *Expert Systems with Applications*, 2020, vol. 162, 113828. doi:10.1016/J.ESWA.2020.113828
  12. Lozano S., Moreno P., Adenso-Díaz B., Algaba E. Cooperative game theory approach to allocating benefits of horizontal cooperation. *European Journal of Operational Research*, 2013, vol. 229, pp. 444–452. doi:10.1016/j.ejor.2013.02.034
  13. Zhao Y., Wang S., Cheng T. C. E., Yang X., Huang Z. Coordination of supply chains by option contracts: A cooperative game theory approach. *European Journal of Operational Research*, 2010, vol. 207, pp. 668–675. doi:10.1016/j.ejor.2010.05.017
  14. Smirnov A. V., Sheremetov L. B., Chilov N., Cortes J. R. Soft-computing technologies for configuration of cooperative supply chain. *Applied Soft Computing*, 2004, vol. 4, pp. 87–107. doi:10.1016/j.asoc.2003.10.001
  15. Ben Jouida S., Krichen S., Klibi W. Coalition-formation problem for sourcing contract design in supply networks. *European Journal of Operational Research*, 2017, vol. 257, pp. 539–558. doi:10.1016/j.ejor.2016.07.040
  16. Sukstrienwong A. Coalition formation of members based on geographical location by genetic algorithm. *TEM Journal*, 2020, vol. 9, pp. 873–880. doi:10.18421/TEM93-06
  17. Guo M., Xin B., Chen J., Wang Y. Multi-agent coalition formation by an efficient genetic algorithm with heuristic initialization and repair strategy. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2020, vol. 55, 100686. doi:10.1016/J.SWEVO.2020.100686
  18. Su Z., Zhang G., Yue F., He J., Li M., Li B., Yao X. Finding the largest successful coalition under the strict goal preferences of agents. *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems*, 2019, vol. 14, iss. 4, pp. 1–33. doi:10.1145/3412370
  19. Guo M., Xin B., Chen J., Wang Y. Multi-agent coalition formation by an efficient genetic algorithm with heuristic initialization and repair strategy. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2020, vol. 55, 100686. doi:10.1016/J.SWEVO.2020.100686
  20. Курейчик В. В., Родзин С. И. Вычислительные модели эволюционных и роевых биоэвристик (обзор). *Информационные технологии*, 2021, т. 27, № 10, с. 507–520. doi:10.17587/it.27.507-520
  21. Смирнов А. В., Молл Е. Г., Тесля Н. Н. Использование нечетких коалиционных игр при принятии социально ориентированных решений при госпитализации в условиях пандемии. *Информатика и автоматизация*, 2021, т. 20, № 5, с. 1090–1114. doi:10.15622/20.5.4
  22. Отчет о результатах деятельности Федерального фонда обязательного медицинского страхования в 2020 году. М., 2021. 148 с. <https://www.ffoms.gov.ru/system-oms/about-fund/fund-activities> (дата обращения: 05.12.2021).
  23. Zhen S., Lin C., Di T., Yang Z. Comparison of steady state and elitist selection genetic algorithms. *Proceedings of International Conference on Intelligent Mechatronics and Automation*, 2004, pp. 495–499. doi:10.1109/ICIMA.2004.1384245
  24. Marsili Libelli S., Alba P. Adaptive mutation in genetic algorithms. *Soft Computing*, 2000, vol. 4, iss. 2, pp. 76–80. doi:10.1007/S005000000042
  25. Gad A. F. PyGAD: An intuitive genetic algorithm Python library. *arXiv*, 2021. <https://arxiv.org/abs/2106.06158v1> (дата обращения: 28.02.2022).

UDC 004.89:004.822

doi:10.31799/1684-8853-2022-2-42-52

### Selecting effective action strategies for the participants in a hospitalization process with the use of a fuzzy cooperative game and a genetic algorithm

Smirnov A. V.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, Chief Researcher, [orcid.org/0000-0001-8364-073X](https://orcid.org/0000-0001-8364-073X)Teslya N. N.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Senior Researcher, [orcid.org/0000-0003-0619-8620](https://orcid.org/0000-0003-0619-8620), [teslya@iias.spb.su](mailto:teslya@iias.spb.su)<sup>a</sup>Saint-Petersburg Federal Research Center of the RAS, 39, 14 Line V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** The use of linear programming methods in making decisions on hospitalization in a fragile epidemiological situation may be hampered by the necessity to take account of a large number of parameters and limitations of the participants. **Purpose:** Development of an approach to selecting effective action strategies for the participants in a hospitalization process, with social factors taken into consideration. The approach is based on the theory of cooperative games which are solved with the use of a genetic algorithm.

**Results:** A cost function has been developed for evaluating the effectiveness of the hospitalization process on the basis of the selected strategies and in consideration of social factors. A genetic algorithm has been designed in which the proposed effectiveness evaluation function is used as a fitness function for a population, while to determine chromosomes of individuals in the population the set of selected strategies of the hospitalization process participants is used. The approach has been tested using the data on hospitalizations of patients with suspected COVID-19, that were provided by several ambulance stations in Saint-Petersburg, Russia. The study shows the superiority of the proposed approach over the previously developed one in terms of the speed of solving a cooperative game, the quality of the solution being maintained. **Practical relevance:** Some software which is based on the proposed approach can be integrated into an ambulance dispatcher's automated workstation to support decision-making during the process of hospitalization in a fragile epidemiological situation.

**Keywords** — genetic algorithm, strategy, strategy selection, hospitalization, fitness function.

**For citation:** Smirnov A. V., Teslya N. N. Selecting effective action strategies for the participants of a hospitalization process with the use of a fuzzy cooperative game and a genetic algorithm. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2022, no. 2, pp. 42–52 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2022-2-42-52

#### Financial support

The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the scientific project No. 20-04-60054, as well as due to Russian State Research project number No. FFZF-2022-0005.

#### References

- Onder M., Uzun M. M. Roles of Artificial Intelligence (AI) on COVID-19 pandemic crisis management policies. *International Journal of Public Administration in the Digital Age*, 2022, vol. 8, iss. 2, pp. 1–13. doi:10.4018/ijpada.294122
- Xiong J., Lipsitz O., Nasri F., Lui L. M. W., Gill H., Phan L., Chen-Li D., Iacobucci M., Ho R., Majeed A., McIntyre R. S. Impact of COVID-19 pandemic on mental health in the general population: A systematic review. *Journal of Affective Disorders*, 2020, vol. 277, pp. 55–64. doi:10.1016/j.jad.2020.08.001
- Shah K., Kamrai D., Mekala H., Mann B., Desai K., Patel R. S. Focus on mental health during the coronavirus (COVID-19) pandemic: Applying learnings from the past outbreaks. *Cureus*, 2020, vol. 12, iss. 3. doi:10.7759/cureus.7405
- Montemurro N. The emotional impact of COVID-19: From medical staff to common people. *Brain, Behavior, and Immunity*, 2020, vol. 87, pp. 23–24. doi:10.1016/j.bbi.2020.03.032
- Li W., Yang Y., Liu Z.-H., Zhao Y.-J., Zhang Q., Zhang L., Cheung T., Xiang Y.-T. Progression of mental health services during the COVID-19 outbreak in China. *International Journal of Biological Sciences*, 2020, vol. 16, pp. 1732–1738. doi:10.7150/ijbs.45120
- Mo Y., Deng L., Zhang L., Lang Q., Liao C., Wang N., Qin M., Huang H. Work stress among Chinese nurses to support Wuhan in fighting against COVID-19 epidemic. *Journal of Nursing Management*, 2020, vol. 28, pp. 1002–1009. doi:10.1111/jonm.13014
- Krasnikov K. E. Mathematical modeling of some social processes using game-theoretic approaches and making managerial decisions based on them. *Russian Technological Journal*, 2021, vol. 9, no. 5, pp. 67–83 (In Russian). doi:10.32362/2500-316X-2021-9-5-67-83
- Sheremetov L. B., Smirnov A. V. *Supply Chain configuration as a cooperative game with fuzzy coalitions*. In: *Supply Chain Management Under Fuzziness*. Springer, 2014. Pp. 293–314. doi:10.1007/978-3-642-53939-8\_13
- Mohebbi S., Li X. Coalitional game theory approach to modeling suppliers' collaboration in supply networks. *International Journal of Production Economics*, 2015, vol. 169, pp. 333–342. doi:10.1016/j.ijpe.2015.08.022
- Omrani H., Shafaat K., Emrouznejad A. An integrated fuzzy clustering cooperative game data envelopment analysis model with application in hospital efficiency. *Expert Systems with Applications*, 2018, vol. 114, pp. 615–628. doi:10.1016/j.eswa.2018.07.074
- Miranda P. B. C., Mello R. F., Nascimento A. C. A. A multi-objective optimization approach for the group formation problem. *Expert Systems with Applications*, 2020, vol. 162, 113828. doi:10.1016/J.ESWA.2020.113828
- Lozano S., Moreno P., Adenso-Diaz B., Algaba E. Cooperative game theory approach to allocating benefits of horizontal cooperation. *European Journal of Operational Research*, 2013, vol. 229, pp. 444–452. doi:10.1016/j.ejor.2013.02.034
- Zhao Y., Wang S., Cheng T. C. E., Yang X., Huang Z. Coordination of supply chains by option contracts: A cooperative game theory approach. *European Journal of Operational Research*, 2010, vol. 207, pp. 668–675. doi:10.1016/j.ejor.2010.05.017
- Smirnov A. V., Sheremetov L. B., Chilov N., Cortes J. R. Soft-computing technologies for configuration of cooperative supply chain. *Applied Soft Computing*, 2004, vol. 4, pp. 87–107. doi:10.1016/j.asoc.2003.10.001
- Ben Jouda S., Krichen S., Klibi W. Coalition-formation problem for sourcing contract design in supply networks. *European Journal of Operational Research*, 2017, vol. 257, pp. 539–558. doi:10.1016/j.ejor.2016.07.040
- Sukstrienwong A. Coalition formation of members based on geographical location by genetic algorithm. *TEM Journal*, 2020, vol. 9, pp. 873–880. doi:10.18421/TEM93-06
- Guo M., Xin B., Chen J., Wang Y. Multi-agent coalition formation by an efficient genetic algorithm with heuristic initialization and repair strategy. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2020, vol. 55, 100686. doi:10.1016/J.SWEVO.2020.100686
- Su Z., Zhang G., Yue F., He J., Li M., Li B., Yao X. Finding the largest successful coalition under the strict goal preferences of agents. *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems*, 2019, vol. 14, iss. 4, pp. 1–33. doi:10.1145/3412370
- Guo M., Xin B., Chen J., Wang Y. Multi-agent coalition formation by an efficient genetic algorithm with heuristic initialization and repair strategy. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2020, vol. 55, 100686. doi:10.1016/J.SWEVO.2020.100686
- Kurejchik V. V., Rodzin S. I. Computational models of bio heuristics based on physical and cognitive processes (review). *Information Technologies*, 2021, vol. 27, no. 10, pp. 507–520 (In Russian). doi:10.17587/it.27.507-520
- Smirnov A., Moll E., and Teslya N. Use of fuzzy coalition games in socially oriented decision making during hospitalization in pandemic. *Informatics and Automation*, 2021, vol. 20, no. 5, pp. 1090–1114 (In Russian). doi:10.15622/20.5.4
- Otchet o rezul'tatah deyatel'nosti Federal'nogo fonda obyazatel'nogo medicinskogo strahovaniya v 2020 godu* [Report on the results of the activities of the Federal Compulsory Medical Insurance Fund in 2020]. Moscow, 2021. 148 p. Available at: <https://www.ffoms.gov.ru/system-oms/about-fund/fund-activities> (accessed 5 December 2021).
- Zhen S., Lin C., Di T., Yang Z. Comparison of steady state and elitist selection genetic algorithms. *Proceedings of International Conference on Intelligent Mechatronics and Automation*, 2004, pp. 495–499. doi:10.1109/ICIMA.2004.1384245
- Marsili Libelli S., Alba P. Adaptive mutation in genetic algorithms. *Soft Computing*, 2000, vol. 4, iss. 2, pp. 76–80. doi:10.1007/S005000000042
- Gad A. F. PyGAD: An intuitive genetic algorithm Python library. *arXiv*, 2021. Available at: <https://arxiv.org/abs/2106.06158v1> (access 28 February 2022).