

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РАВНОМЕРНОСТИ НАГРУЗКИ В КОМПЛЕКСЕ РОБОТИЗИРОВАННЫХ НАЗЕМНЫХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

Соловьев В.В.

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург*

Ключевые слова: роботизированные наземные транспортно-технологические машины, децентрализованная координация, равномерность нагрузки, коэффициент Джини, энергосберегающая стратегия, распределение задач, имитационное моделирование, справедливое распределение, коэффициент вариации.

Аннотация. В статье представлена методика количественной оценки равномерности распределения нагрузки в комплексе роботизированных наземных транспортно-технологических машин, функционирующих в условиях децентрализованной многозадачной координации. Актуальность исследования обусловлена необходимостью предотвращения перегрузки отдельных машин и преждевременного истощения их энергетических ресурсов, что особенно критично при ограниченном запасе топлива или заряда аккумуляторов. Предлагаемый подход базируется на использовании коэффициента Джини - статистического показателя, позволяющего измерять неравномерность распределения по различным показателям, например, по количеству выполненных задач и по суммарным энергетическим затратам. Для верификации методики проведены вычислительные эксперименты на двух моделируемых комплексах машин, сформированных по проектам организации строительства современных скоростных автомобильных дорог, при трех сценариях ресурсного обеспечения: дефицит, равновесие и избыток энергии. В отличие от традиционных подходов, ориентированных только на глобальную оптимизацию, предложенная методика позволяет выявить скрытые диспропорции загрузки, возникающие при децентрализованном принятии решений. Сравнительный анализ по коэффициенту Джини с помощью представленной методики пяти различных стратегий координации (энергосберегающая, минимизации временных задержек, прямого перебора, рыночная, Q-learning) дает представление о равномерности загрузки парка машин при расчете других показателей. При помощи этой методики установлено, что энергосберегающая стратегия обеспечивает наиболее справедливое распределение энергозатрат, что подтверждает ее применимость для создания самоорганизующихся систем управления дорожно-строительной техникой.

METHODOLOGY FOR ASSESSING LOAD UNIFORMITY IN A FLEET OF ROBOTIC GROUND TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL MACHINES

Solovyov V.V.

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg

Keywords: robotic ground transport and technological machines, decentralized coordination, load uniformity, Gini coefficient, energy-saving strategy, task allocation, simulation modeling, fair distribution, coefficient of variation.

Abstract. The paper presents a methodology for quantitative assessment of load distribution uniformity in a fleet of robotic ground transport and technological machines operating under decentralized multi-task coordination. The relevance of the study stems from the need to prevent overloading of individual machines and premature depletion of their energy resources, which is especially critical under limited fuel or battery capacity. The proposed approach is based on the Gini coefficient - a statistical measure that evaluates inequality across various indicators, such as the number of completed tasks and total energy consumption. To verify the methodology, computational experiments were conducted on two simulated machines fleets formed according to the construction organization projects for the modern high-speed highways, under three resource availability scenarios: deficit, equilibrium, and surplus. Unlike traditional approaches focused solely on global optimization, the proposed methodology reveals hidden load imbalances arising from decentralized decision-making. A comparative Gini-based analysis of five coordination strategies (energy-saving, delay minimization, direct search, market-based, and Q-learning) provides insight into fleet load uniformity when calculating other performance metrics. Using this methodology, it was found that the energy-saving strategy ensures the fairest distribution of energy consumption, confirming its applicability for creating self-organizing control systems for road construction machinery.

Введение

Современный этап развития наземных транспортно-технологических машин (НТТМ) характеризуется активным внедрением роботизированных комплексов, функционирующих в условиях высокой неопределенности и ограниченных ресурсов. Так, будущее дорожное строительство можно представить как «оркестр»: десятки роботизированных НТТМ (РНТТМ) - экскаваторов, бульдозеров, катков и самосвалов - работают одновременно на одной площадке. Каждая из них автономна, действует по своим локальным правилам, но общая «мелодия» зависит от того, насколько слаженно они распределяют между собой задачи. Если одни машины перегружены, а другие простаивают, производительность падает, энергия тратится впустую, а сроки срываются. Особенно остро эта проблема стоит в условиях ограниченных ресурсов (топлива, заряда аккумуляторов) и нестабильной связи, когда централизованное управление становится ненадежным. Таким образом, особенно актуальной становится задача эффективной организации работы комплекса РНТТМ, выполняющих разнородные технологические операции в рамках единого производственного процесса [1].

В работе [2] была предложена имитационная модель, а в работе [3] стратегии децентрализованной многозадачной координации для комплекса РНТТМ. Одним из ключевых вопросов при этом оставалась справедливость распределения нагрузки: не происходит ли так, что какие-то машины работают «на износ», а другие «отдыхают»? И если да, то как это измерить количественно?

Данная статья посвящена разработке и апробации методики оценки равномерности загрузки в комплексе РНТТМ. В отличие от классических работ [4-6], где доминируют глобальные критерии, предлагается использовать коэффициент Джини: инструмент, заимствованный из экономики, но оказавшийся весьма уместным для анализа «социальной справедливости» в комплексе машин. Представленная методика учитывает два аспекта: количество выполненных задач и объем потребленной энергии. Проведены вычислительные эксперименты на разномасштабных комплексах и трех сценариях ресурсного обеспечения (дефицит, равновесие, избыток).

Материалы и методы исследования

Объектом исследования служит комплекс РНТТМ, как множество роботизированных машин $\mathcal{R} = \{R_1, \dots, R_N\}$, выполняющих множество задач $\mathcal{T} = \{T_1, \dots, T_M\}$. Каждая машина характеризуется запасом энергии E_i и набором навесного оборудования Eqp_i . Каждая задача требует определенного типа оборудования Req_i и «стоит» некоторого количества энергии Θ_{T_j} (сложность выполнения). Задачи поступают в систему пуассоновским потоком, а машины автономно выбирают, за какую задачу взяться, руководствуясь одной из сравниваемых стратегий координации (рис. 1).

Для комплекса рассматриваются пять стратегий распределения задач между РНТТМ в комплексе (табл. 1).

Табл. 1. Стратегии распределения задач

№	Наименование	Обозначение	Краткая характеристика
1	Энергосберегающая	$\Gamma_{\min \Theta}$	Выбор задачи, минимизирующий отношение сложности задачи к остатку энергии РНТТМ
2	Минимизации временных задержек	$\Gamma_{\min B3}$	Учет возраста задачи и максимизация полезности как отрицательного штрафа за произведение возраста и сложности плюс коэффициент координации
3	Прямой перебор	$\Gamma_{\text{прям}}$	Детерминированный циклический обход машин и задач
4	Рыночных методов	Γ_{market}	Распределение через аукцион ставок [6]
5	Q-learning	$\Gamma_{\text{Q-learning}}$	Обучение с подкреплением [7]

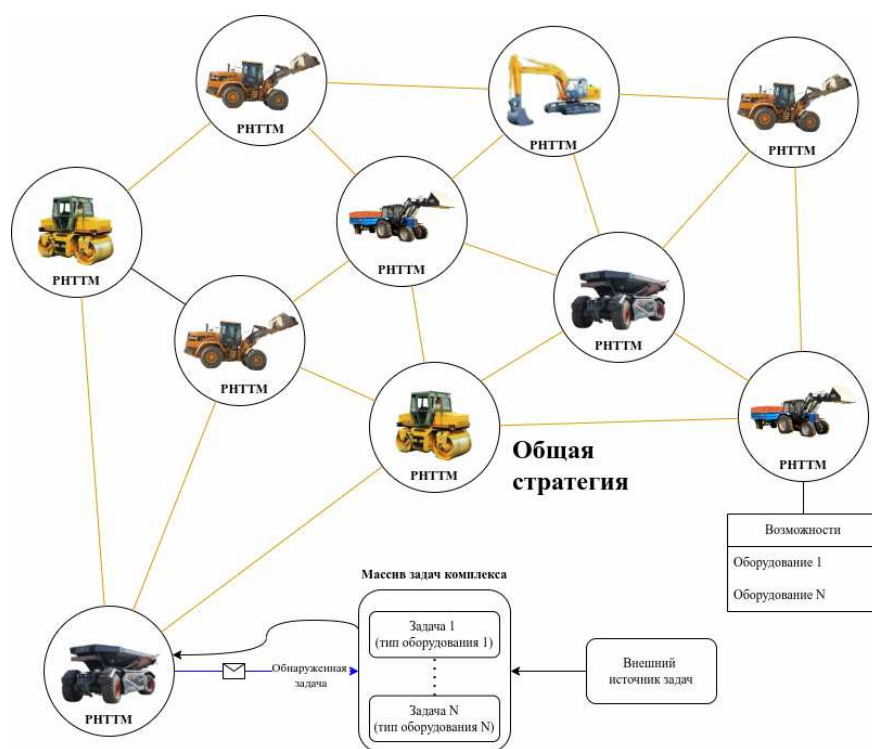


Рис. 1. Модель системы

Исходными данными для параметризации модели послужили утвержденные проекты организации строительства современных скоростных автомобильных дорог М-11 «Москва - Санкт-Петербург» и М-12 «Москва - Нижний Новгород - Казань». На основе анализа ведомостей потребности в машинах и механизмах выделены типовые технологические комплексы НТТМ: подготовительных работ, земляных работ, устройства дорожной одежды, строительства искусственных сооружений, переустройства инженерных коммуникаций и вспомогательный транспортно-технологический.

Пример состава одного из комплексов при транспортном строительстве автодороги М-12 приведен в таблице 2.

Вычислительные эксперименты проведены на имитационной модели децентрализованной многозадачной координации комплекса РНТТМ в двух конфигурациях: малый комплекс машин, который соответствует типовому специализированному комплексу по возведению земляного полотна и устройству дорожной одежды, и большой комплекс машин, отражающий суммарный парк техники для нескольких технологических потоков при строительстве скоростной автомобильной дороги.

Табл. 2. Состав комплекса машин подготовительных работ

№	Наименование	Тип, марка	Кол-во, шт.	Основные технологические операции
1	Автогрейдер средний	ДЗ-180	10	Профилирование временных дорог, планировка площадок
2	Автогрейдер тяжелый	ДЗ-98	8	Окончательная планировка верха земляного полотна
3	Экскаватор (0,25 м³)	ЭО-2621В-3	4	Рытье небольших котлованов, погрузка порубочных остатков
4	Экскаватор (0,65 м³)	& ЭО-4321А	10	Разработка грунта, погрузка в автосамосвалы
5	Экскаватор (1,0 м³)	ЭО-4321	18	Разработка выемок основного объема
6	Экскаватор-планировщик (0,5 м³)	ЭО-43214	8	Планировка откосов насыпей и выемок

Табл. 2. Продолжение

№	Наименование	Тип, марка	Кол-во, шт.	Основные технологические операции
7	Экскаватор-погрузчик (0,8 м ³)	ЭО-2626ДТ	12	Погрузка материалов, обратная засыпка траншей
8	Бульдозер (95 л.с.)	ДТ-75	8	Срезка кустарника, разравнивание грунта
9	Бульдозер (180 л.с.)	ДЗ-101А	12	Перемещение грунта на расстояние до 50 м, грубая планировка
10	Распределитель дорожно-строительных материалов	ДС-54	8	Распределение ЦПС и щебня по ширине основания
11	Автокран (16 т.)	КС-4362	8	Монтаж сборных железобетонных конструкций, труб
12	Буровая машина	БМ-302М	1	Бурение лидерных скважин под сваи, опоры
13	Каток на пневмошинах (25 т.)	Lutong LTP1826	8	Уплотнение песчаных и щебеночных слоев
14	Каток гладковальцовый (13 т.)	Hamm HD110	8	Окончательное уплотнение основания и покрытия
15	Виброкаток (10 т.)	Bomag BW211D-4	6	Уплотнение связных грунтов, ЦПС
16	Виброкаток (8 т.)	Bomag BW177D-5	6	Уплотнение тонких слоев, работа в стесненных условиях
17	Виброплита	ВП-2-4-1	14	Уплотнение в пазах труб, на конусах мостов
18	Трактор гусеничный (108 л.с.)	Komatsu D39	12	Трелевка, перемещение грузов по слабонесущим грунтам
19	Трактор-корчеватель	ДП-25 (с ДЭМ-121)	4	Корчевка пней, удаление корней
20	Трелевочный трактор	ТДТ-55	4	Трелевка древесины
21	Мульчер самоходный (250 л.с.)	ТМ-250	4	Измельчение порубочных остатков, кустарника
22	Насос водоотливной (до 25 м ³ /ч.)	ГНОМ 25-20	4	Водоотлив из котлованов
23	Насос водоотливной (10 м ³ /ч.)	ГНОМ 10-10	4	Водоотлив из небольших приямков
24	Автоцистерна (10 м ³)	АЦ-10	4	Подвоз воды для производственных нужд
25	Поливомоечная машина	КО-823	16	Обеспыливание временных дорог, увлажнение грунта
26	Автосамосвал (15 т.)	КамАЗ-65115	56	Перевозка грунта, песка, щебня
27	Автомобиль бортовой (6 т.)	ЗИЛ-130	16	Доставка штучных грузов, инструмента
28	Компрессор передвижной	ПКС	8	Обеспечение сжатым воздухом
29	Мобильный АБЗ	Ammann BlackMove-II-320	3	Приготовление асфальтобетонных смесей

Для каждой конфигурации заданы три сценария (параметризация) суммарной энергии машин:

- дефицитный сценарий ($E_i < \Theta_j : \min$), суммарная энергия машин меньше суммарных потребностей задач;
- равновесный ($E_i \approx \Theta_j : equal$), энергия машин сопоставима со сложностью задач;
- избыточный ($E_i > \Theta_j : \max$), энергия машин существенно превышает энергоемкость задач.

Всего определено шагов моделирования $S = 30$.

Для количественной оценки равномерности распределения нагрузки предлагается использовать коэффициент Джини $G(x)$, применимость к теме исследования которого была рассмотрена в работах [8-10]. Так, для вектора неотрицательных значений $x = \{x_1, \dots, x_N\}$ вычисляется по формуле:

$$G(x) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |x_i - x_j|}{2N \sum_{j=1}^N x_j}. \quad (1)$$

Значения G находятся в интервале $[0,1]: G=0$, при этом $G=0$ соответствует абсолютному равенству (все машины получили одинаковую нагрузку), а $G=1$ – максимальному неравенству (вся нагрузка сконцентрирована на одной машине).

В текущей задаче требуется рассчитать 2 коэффициента на каждом дискретном шаге $s \in S$:

- по количеству задач используется вектор $n_s = (n_{1,s}, \dots, n_{N,s})$, где $n_{i,s} = |T_s(i)|$ это число задач, завершенных машиной i на шаге s ;
- по энергозатратам - вектор $\varepsilon_s = (\varepsilon_{1,s}, \dots, \varepsilon_{N,s})$, где $\varepsilon_{i,s} = \sum_{T_j \in T_s(i)} \Theta_j$ это суммарная энергия, потраченная машиной i на шаге s .

Для каждой стратегии и сценария по всем шагам вычисляются среднее $\bar{G}$ и медиана $\text{med } G$, что позволяет оценить как типичную неравномерность, так и устойчивость поведения.

Все прогоны выполнены в разработанной имитационной среде на языке программирования высокого уровня Go «Симулятор многозадачной координации групп роботизированных наземных транспортно-технологических средств (СМК-НТТС)» (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2025690320). Для каждой пары «стратегия и сценарий» проведено S независимых реплик с идентичными исходными данными (начальные энергозапасы, множество задач). Это позволило применить закон больших чисел и получить выборочные средние с низкой стандартной ошибкой. Результаты обработаны с помощью авторского программного комплекса «Анализатор эффективности стратегий координации для групп роботизированных наземных транспортно-технологических машин (АЭСК-НТТМ)» (свидетельство № 2026612518).

Для интегральной оценки эффективности стратегии Γ использовался обобщённый показатель:

$$Q(\Gamma) = \alpha_1 \tilde{P} + \alpha_2 \tilde{\eta} + \alpha_3 (1 - \tilde{T}) + \alpha_4 (1 - \tilde{G}^{\text{задачи}}) + \alpha_5 (1 - \tilde{G}^{\text{энергия}}), \quad (2)$$

где P – доля успешно выполненных задач; η – отношение суммарной сложности выполненных задач к общим энергозатратам; T – среднее время пребывания задачи в системе; G – коэффициенты Джини, рассчитанные соответственно по количеству выполненных задач и по затраченной энергии; знак «тильда» обозначает нормализацию $[0-1]$ относительно множества всех стратегий, а веса α_i задают приоритеты (производительность, энергоэффективность, справедливость, сбалансированный подход).

Результаты

Основные результаты по коэффициентам Джини для малого комплекса сведены в таблицу 3 (аналогичные тенденции наблюдаются и для большого комплекса). Наиболее показательным является сценарий дефицита ресурсов - самый жесткий и приближенный к реальным условиям.

Табл. 3. Коэффициенты Джини (средние) для малого комплекса в сценарии дефицита

№	Стратегия	$G_{\text{задачи}}$	$G_{\text{энергия}}$
1	$\Gamma_{\min\text{Э}}$	0,161	0,079
2	$\Gamma_{\min\text{B3}}$	0,183	0,095
3	$\Gamma_{\text{прям}}$	0,178	0,292
4	Γ_{market}	0,179	0,076
5	$\Gamma_{\text{Q-learning}}$	0,158	0,079

Обратим внимание на энергетическую справедливость (последний столбец). Энергосберегающая стратегия почти не уступает рыночному методу и Q-learning, но при этом она выполняет на 30-40% больше задач (51,6% против 37-45% у конкурентов). Прямой перебор, напротив, дает высокую неравномерность по энергозатратам: часть машин быстро разряжается, а другие нет, но не могут выполнить оставшиеся задачи из-за несовместимости оборудования.

В сценарии равновесия и избытка энергосберегающая стратегия также демонстрирует умеренную и стабильную неравномерность, что лучше, чем у стратегии минимизации задержек и сопоставимо с лучшими рыночными методами.

Все метрики сведем воедино с помощью интегрального показателя $Q(\Gamma)$ для сбалансированного подхода (табл. 4): $\alpha_1 = 0,25$; $\alpha_2 = 0,25$; $\alpha_3 = 0,25$; $\alpha_4 = 0,125$; $\alpha_5 = 0,125$,

где α это весовые коэффициенты, удовлетворяющие условию $\sum_{i=1}^5 \alpha_i = 1$.

Табл. 4. Интегральная оценка эффективности стратегий (усреднение по всем сценариям)

№	Стратегия	$Q(\Gamma)$
1	$\Gamma_{\min\text{Э}}$	0,81
2	$\Gamma_{\min\text{B3}}$	0,78
3	$\Gamma_{\text{прям}}$	0,70
4	Γ_{market}	0,64
5	$\Gamma_{\text{Q-learning}}$	0,47

Энергосберегающая стратегия лидирует во всех приоритетах: она не только дает наивысший процент выполнения задач, но и обеспечивает наиболее справедливое распределение нагрузки, что особенно важно для долговременной эксплуатации - равномерный износ машин, предсказуемое время между заправками, отсутствие «бутылочных горлышек».

Выводы

Коэффициент Джини - простой и наглядный инструмент для оценки справедливости распределения нагрузки в комплексе РНТТМ. Он позволяет количественно сравнивать различные стратегии координации по двум важнейшим аспектам: количеству выполненных задач и затраченной энергии.

Энергосберегающая стратегия обеспечивает не только высокую производительность, но и низкую неравномерность. Это достигается за счет того, что машины автоматически избегают слишком дорогих задач, когда их энергия на исходе, и наоборот - берут на себя сложную работу, если ресурсов достаточно.

Разработанная методика успешно апробирована на разных масштабах комплексов машин и показала устойчивость к изменению числа РНТТМ. Она может быть рекомендована для использования при выборе алгоритмов децентрализованной координации в проектах дорожного и промышленного строительства с использованием комплексов РНТТМ.

Заключение. В работе предложена и экспериментально обоснована методика количественной оценки справедливости распределения нагрузки в комплексе роботизированных наземных транспортно-технологических машин. Использование коэффициента Джини позволило выявить сильные и слабые стороны различных стратегий координации и оценить их справедливость.

Список литературы

1. Грушецкий С.М. Эффективность применения строительно-дорожных машин в современных условиях: монография. – СПб.: Петрополис, 2021. – 168 с.
2. Соловьев В.В., Евтюков С.А. Модель системы многозадачной координации автоматизированных транспортно-технологических средств // Грузовик. – 2023. – №7. – С. 36-39. – doi.org/10.36652/1684-1298-2023-7-36-39.
3. Соловьев В.В., Евтюков С.А. Общие стратегии выбора задач в группе роботизированных наземных транспортно-технологических средств (машин) // Грузовик. – 2025. – №10. – С. 33-37. – doi.org/10.36652/1684-1298-2025-10-33-37.
4. Gerkey B.P., Mataric M.J. A formal analysis and taxonomy of task allocation in multi-robot systems // The International Journal of Robotics Research. 2004, vol. 23, no. 9, pp. 939-954. doi.org/10.1177/0278364904045564.
5. Korsah G.A., Stentz A., Dias M.B. A comprehensive taxonomy for multi-robot task allocation // The International Journal of Robotics Research. 2013, vol. 32, no. 12, pp. 1495-1512. doi.org/10.1177/0278364913496484.
6. Dias M.B., Zlot R., Kalra N., Stentz A. Market-based multirobot coordination: A survey and analysis // Proceedings of the IEEE. 2006, vol. 94, no. 7, pp. 1257-1270. doi.org/10.1109/JPROC.2006.876939.
7. Кошманова Н.П., Трифонов Д.С., Павловский В.Е. Управление манипулятором с помощью обучения с подкреплением // Нелинейная динамика. – 2012. – Т. 8, №4. – С. 689-704.
- 8-10. См. *References*.

References

1. Grushetsky S.M. Efficiency of using construction and road machinery in modern conditions: monograph. – SPb.: Petropolis, 2021. – 168 p.
2. Solovyov V.V., Evtyukov S.A. Model of multi-task coordination system for automated ground transport and technological vehicles // Truck. 2023, no. 7, pp. 36-39. doi.org/10.36652/1684-1298-2023-7-36-39.
3. Solovyov V.V., Evtyukov S.A. General strategies for task selection in a group of robotic ground transport and technological vehicles (machines) // Truck. 2025, no. 10, pp. 33-37. doi.org/10.36652/1684-1298-2025-10-33-37.
4. Gerkey B.P., Mataric M.J. A formal analysis and taxonomy of task allocation in multi-robot systems // The International Journal of Robotics Research. 2004, vol. 23, no. 9, pp. 939-954. doi.org/10.1177/0278364904045564.
5. Korsah G.A., Stentz A., Dias M.B. A comprehensive taxonomy for multi-robot task allocation // The International Journal of Robotics Research. 2013, vol. 32, no. 12, pp. 1495-1512. doi.org/10.1177/0278364913496484.
6. Dias M.B., Zlot R., Kalra N., Stentz A. Market-based multirobot coordination: A survey and analysis // Proceedings of the IEEE. 2006, vol. 94, no. 7, pp. 1257-1270. doi.org/10.1109/JPROC.2006.876939.
7. Koshmanova N.P., Trifonov D.S., Pavlovsky V.E. Manipulator control using reinforcement learning // Nonlinear dynamics. 2012, vol. 8, no. 4, pp. 689-704.
8. Wu D.F., Zeng G.P., Meng L.G., Zhou W.J., Li L.M. Gini coefficient-based task allocation for multi-robot systems with limited energy resources // IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica. 2018, vol. 5, no. 1, pp. 155-168. doi.org/10.1109/JAS.2017.7510385.
9. Liu Z.X., Shi H.G., Yan W.H., Jin Z.Q., Zhou Y. A fairness-aware cooperation strategy for multi-agent systems driven by deep reinforcement learning // Proceedings of the 41st Chinese Control Conference (CCC). 2022, pp. 4943-4948. doi.org/10.23919/CCC55666.2022.9902130.
10. Xie T., Guo J., Zhang X., Yu J., Zhang Z. Improved CNP-method-based local real-time cooperative task allocation of heterogeneous multi-UAV in communication-constrained environment // Mathematical Problems in Engineering. 2022, vol. 2022, no. 1, p. 6568334. doi.org/10.1155/2022/6568334.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Соловьев Виктор Владимирович – аспирант	Solovyov Viktor Vladimirovich – postgraduate student
i@viktor-solovev.ru	

Получена 29.05.2026